



# ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ МИНЕРАЛОГИЯ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Сборник статей  
IX Российского семинара  
по технологической минералогии









RUSSIAN MINERALOGICAL SOCIETY  
COMMISSION ON TECHNOLOGICAL MINERALOGY

RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES  
KARELIAN RESEARCH CENTRE  
INSTITUTE OF GEOLOGY



# **TECHNOLOGICAL MINERALOGY OF NATURAL AND ANTHROPOGENOUS DEPOSITS**

**Collection of articles of the IX Russian Seminar  
of the Technological Mineralogy**

**Magnitogorsk, April, 22–24, 2014**

Edited by Dr.sc. Vladimir V. Shchiptsov

Petrozavodsk  
2015



РОССИЙСКОЕ МИНЕРАЛОГИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО  
КОМИССИЯ ПО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МИНЕРАЛОГИИ

КАРЕЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
ИНСТИТУТ ГЕОЛОГИИ



# **ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ МИНЕРАЛОГИЯ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

**Сборник статей IX Российского семинара  
по технологической минералогии**

**Магнитогорск, 22–24 апреля 2014 г.**

Под редакцией д.г.-м.н. В. В. Щипцова

Петрозаводск  
2015



УДК 622.7  
ББК 33.4  
Т38

Рецензент:  
к.г.-м.н. Бушмин С. А.

Т38      **ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ МИНЕРАЛОГИЯ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ  
МЕСТОРОЖДЕНИЙ.** Сборник статей IX семинара по технологической минералогии.  
Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. 171 с.

ISBN 978–5–9274–0460–5

© Российское минералогическое общество, 2015  
© Карельский научный центр РАН, 2015  
© Институт геологии КарНЦ РАН, 2015



## ПРЕДИСЛОВИЕ

Перед читателем 9-ый выпуск трудов по технологической минералогии. Комиссия по технологической минералогии издает ежегодно сборник научных статей, начиная с 2006 г. В основу таких выпусков включаются материалы предшествующих семинаров (Петрозаводск-2006, 2007, 2008, Казань-2009, Сыктывкар-2010, Петрозаводск-2011, Москва-2012, Санкт-Петербург-2013, Магнитогорск-2014). В этот сборник включены статьи по тематике семинара, который состоялся в г. Магнитогорске.

IX Российский семинар по технологической минералогии «Технологическая минералогия природных и техногенных месторождений» проходил 22–24 апреля 2014 г. в Магнитогорске на базе Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. Семинар организовали Комиссия по технологической минералогии РМО, ФГБОУ ВПО «МГТУ» и ИГ КарНЦ РАН.

В мероприятии участвовали представители академических и отраслевых институтов, ВУЗов и производственных организаций из 11 городов России: Апатиты (ИХТРЭМС КНЦ РАН, ИППЭС КНЦ РАН), Белгород (БГТУ им. В. Г. Шухова), Магнитогорск (МГТУ, Институт горного дела и транспорта МГТУ, ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат», ЗАО «Урал-Омега», ООО «Евросинтез»), Миасс (ИМ УрО РАН), Москва (ФГУП «ВИМС», ИПКОН РАН, ОИВТ РАН, ИГЕМ РАН, РГТУ), Петрозаводск (ИГ КарНЦ РАН, ПетрГУ), Санкт-Петербург (НИУ ИТМО), Сибай (ООО «Башкирская медь»), Сыктывкар (ИГ КомиНЦ УрО РАН, Уфа (ООО «Клариса»), Учалы (ОАО «Учалинский ГОК», Уральское представительство СП ЗАО «ИВС», Учалинский филиал ОАО «Башкиргеология»). Научная программа семинара была ориентирована на проблемы освоения рудных месторождений, развития горно-металлургического производства и охватывала следующие направления исследований в технологической минералогии:

1. Современные технологии переработки и утилизации отходов горно-металлургического производства.

2. Технологическая минералогия рудных месторождений и инновационные решения в области комплексной переработки минерального сырья.

3. Роль технологической минералогии в высоких технологиях вторичной переработки минерального сырья.

4. Прогнозная оценка обогатимости природного и техногенного минерального сырья.

С приветственными словами на открытии семинара выступили председатель Комиссии по технологической минералогии РМО, директор Института геологии КарНЦ РАН д.г.-м.н. В. В. Щипцов, первый проректор – проректор по научной и инновационной работе ФГБОУ ВПО «МГТУ» д.т.н., проф. М. В. Чукин и директор Института горного дела и транспорта МГТУ, д.т.н., проф. С. Е. Гавришев. Пленарные доклады на семинаре сделали члены комиссии по технологической минералогии – чл. корр. РАН А. И. Николаев «Титаносиликатные функциональные материалы из продуктов переработки Кольского сырья» и д.г.-м.н. Г. Б. Мелентьев «Техногенные ресурсы России: приоритетные направления оценки, инновационные технологические решения и создание инвестиционно-привлекательного законодательства».

В последующие два дня работа семинара проходила в загородном комплексе Магнитогорского университета «Юность» в живописном курортном поселке на берегу озера Банное. Здесь состоялись научные сессии, где был рассмотрен широкий круг актуальных и дискуссионных вопросов фундаментального и прикладного значения современной технологической минералогии. Было заслушано 32 устных выступления, работала стендовая сессия. Значительная часть докладов была посвящена проблемам, связанным с изучением рудных месторождений. Проф. М. В. Рыльникова (ИПКОН РАН, Москва) привела в своем сообщении обоснование требований к качеству природного и техногенного сырья при полном цикле комплексного освоения рудных месторождений. Д.г.-м.н. О. Б. Котова (ИГ КомиНЦ УрО РАН, Сыктывкар) рассмотрела минералогические аспекты рационального использования природного и техногенного сырья. Проблемы освоения и переработки медно-кобальтовых руд Дергамыжского месторождения изложены Рачковой Е. Н. с соавторами (ООО «Башкирская медь», Сибай). В коллективном докладе, представленном С. И. Ануфриевой (ВИМС, Москва) оценена возможность селективной карботермической твердофазной металлизации хромовых руд Сарановского месторождения. Ряд докладов был посвящен исследованию благороднометалльной минерализации в рудах различных ме-



сторождений. Так, д.т.н. А. П. Козловым с соавторами (ИПКОН РАН, Москва) изучена платиносодержащая минерализация в дунитовых рудах методами автоматизированной минералогии; результаты минералогических исследований ассоциации золота и редковстречающихся минералов в рудах Октябрьского колчеданного месторождения рассмотрены Козорез М. В. (Уральское представительство СП ЗАО «ИВС», Учалы); формы нахождения золота в сульфидах проанализированы д.г.-м.н. И. В. Викентьевым (ИГЕМ РАН, Москва). Обширный доклад об инновационном этапе освоения и использования редкометалльного потенциала Урала сделал известный специалист Г. Б. Мелентьев (ОИВТ РАН). Интересные по содержанию были два доклада А. Г. Касикова (ИХТРЭМС КНЦ РАН) по исследованиям медно-никелевого продукта и фэйштейна и никель-кобальтовой массы на месторождениях Кольского полуострова.

Проблемы использования и переработки техногенного сырья были затронуты в нескольких докладах. Результаты минералого-геохимического исследования шлаков металлургического передела медно-никелевых руд Кольского полуострова рассмотрены в докладе Потапова С. С., Потапова Д. С., Паршиной Н. В., Макарова Д. В., Светлова А. В., Ерохина Ю. В. (ИМин УрО РАН; ИППЭС КНЦ РАН, ИГиГ УрО РАН). Бигеев В. А. и Панишев Н. В. (МГТУ, Магнитогорск) представили доклад «О рециклинге металлургических шламов и хвостов из техногенных образований».

Несколько докладов были посвящены вопросам изучения неметаллических полезных ископаемых. О возможностях применения рентгеновского количественного фазового анализа для продуктов технологического передела галит-сильвинового сырья Верхнекамского месторождения доложил П. В. Хворов (ИМ УрО РАН, Миасс); научное обоснование потенциала кварца из техногенных отвалов слюдоносных пегматитов Северной Карелии изложено в сообщении Скамницкой Л. С., Бубновой Т. П., Дубинчука В. Т., Ракова Л. Т. (ИГ КарНЦ РАН, Петрозаводск; ИГЕМ РАН и ФГУП «ВИМС», Москва); прогнозу обогатимости палеопротерозойских кварцито-песчанников Центральной Карелии как потенциально перспективного материала для производства высокочистых кварцевых концентратов посвящен доклад Световой Е. Н. и Скамницкой Л. С. (ИГ КарНЦ РАН, Петрозаводск); геохимиче-

ские особенности полевых шпатов из гранитов рапакиви Салминского массива рассмотрены в докладе Бубновой Т. П., Скамницкой Л. С. (ИГ КарНЦ РАН, Петрозаводск); новая методика оптической сортировки минералов из пегматитов Карельских месторождений предложена в докладе Горбуновой Е. В., Чертова А. Н., Щипцова В. В. (НИУ ИТМО, СПб; ИГ КарНЦ РАН, Петрозаводск); некоторые аспекты технологической минералогии строительных материалов обсуждены Жерновским И. В. (БГТУ, Белгород).

В отдельную секцию на семинаре были объединены доклады молодых специалистов и аспирантов. Участниками семинара отмечен высокий уровень подготовки докладов, владения материалами исследований. Наиболее содержательные выступления молодых ученых бюро Комиссии по технологической минералогии РМО отметили дипломами: О. Е. Корнейчик (ИПКОН РАН) и И. Г. Быстров (ФГУП ВИМС) награждены дипломами I степени, М. С. Колкова и В. Ш. Галямов (ФГБОУ ВПО «МГТУ») получили дипломы II степени, А. Г. Никифоров (ИГ КарНЦ РАН) и М. Ф. Тулубаева (ФГБОУ ВПО «МГТУ») удостоились дипломов III степени.

В рамках семинара состоялась экскурсия на ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат», входящий в число крупнейших мировых производителей стали и занимающий лидирующие позиции среди предприятий черной металлургии России. В 2013 г. Группой ММК произведено 11,9 млн тонн стали и 11 млн тонн товарной металлопродукции. Участники семинара посетили несколько цехов комбината, в том числе уникальный комплекс по производству толстолистового проката «Стан 5000», введенный в эксплуатацию в 2009 году; цех холодного проката, выпускающий по самым современным технологиям высококачественный холоднокатаный и оцинкованный прокат для внешних и внутренних деталей автомобилей и другой техники; а также цех по производству агломерата. Состоялось посещение эксплуатируемого в настоящее время месторождения скарново-магнетитовых руд «Подотвальное», входящее в магнитогорскую группу месторождений железных руд.

А. П. Козлов, заместитель директора по науке ИПКОН РАН, выступил с обзорной лекцией перед студентами МГТУ о будущем горно-металлургической отрасли в России, которая вызвала большой интерес у студентов и пре-



подавателей. 21 апреля состоялась встреча А. И. Николаева и В. В. Щипцова с руководством МГТУ, где были обсуждены вопросы творческого взаимодействия Комиссии по технологической минералогии с МГТУ им. Г. И. Носова.

К семинару был издан очередной выпуск сборника научных статей по материалам прошедшего в 2013 году **VIII семинара по технологической минералогии** на базе «Механобр-Техника» в Санкт-Петербурге (Прогнозная оценка технологических свойств полезных ископаемых методами прикладной минералогии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2014. 197 с.). Помимо этого, Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова издал сборник научных трудов «Рациональное недропользование» (Рациональное недропользование: сб. научн. трудов // под редакцией С. Е. Гавришева. Магнитогорск: Изд-во МГТУ, 2014. 300 с.). В сборнике представлены работы сотрудников университета и участников **IX Российского семинара по технологической минералогии**. Сборник выполнен в рамках стратегического развития МГТУ им. Г. И. Носова и посвящен 80-летию этого университета.

В ходе заключительной дискуссии и подведения итогов семинара выступили А. И. Николаев,

А. Н. Чертов, Г. Б. Мелентьев, И. В. Жерновский, Е. А. Горбатова, В. В. Щипцов. Резюмируя их выступления, можно в итоге отметить высокий уровень организации и проведения научного семинара в Магнитогорске. Участники семинара выразили большую благодарность за хорошую организацию IX Российского семинара и экскурсии на Магнитогорский металлургический комбинат руководству ФГБОУ ВПО «МГТУ», Институту горного дела и транспорта МГТУ и администрации ММК.

24 апреля состоялось открытое заседание комиссии по технологической минералогии, на которое были приглашены участники семинара.

Следующий **X семинар по технологической минералогии** проводится в апреле 2015 г. в Белгороде на базе Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова под титулом «Роль технологической минералогии в получении конечных продуктов пердела минерального сырья». Как и в прошлые годы, участники семинара получают на руки подготовленный выпуск.

Комиссия выражает глубокую признательность рецензенту Сергею Михайловичу Бушмину (ИГГД РАН) за работу по оценке материалов сборника, замечания и добрые советы.



# ИННОВАЦИОННЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ТЕХНОГЕННЫХ РЕСУРСОВ РОССИИ И РОЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ГЕОХИМИИ В ИХ ИЗУЧЕНИИ И ОЦЕНКЕ ПЕРСПЕКТИВ КОМПЛЕКСНОГО ПРОМЫШЛЕННОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Мелентьев Г. Б.

ОИВТ РАН, г. Москва

Техногенные ресурсы России представляют собой неиспользуемую в должном объеме резервную материальную базу перерабатывающих производств и, в то же время, источники экологического неблагополучия и роста заболеваемости населения. Новая Россия в полной мере унаследовала от СССР нерешенные проблемы комплексного использования минерального сырья и накопления отходов ГПК, ХМК и ТЭК, обусловленные узковедомственной отраслевой специализацией советских горнодобывающих предприятий. В новых экономических условиях эти предприятия ориентированы на получение максимальной прибыли при минимальных затратах. Такой *экстенсивный* способ горнопромышленного производства находится в полном противоречии с природными процессами минерало- и рудообразования, которые обусловили формирование устойчивых парагенетических ассоциаций промышленно-ценных компонентов и минералов-концентраторов с суммарной извлекаемой ценностью, предопределяющей необходимость рационального использования исходного сырья как невозобновляемого ресурса природы. С этих позиций очевидна необходимость систематического учета на всех стадиях геологоразведки, добычи, обогащения и переделов минерального сырья специфики его поликомпонентного состава, т. е. соотношений между ведущими и сопутствующими рудными и нерудными полезными компонентами, определяющими его потенциальную и извлекаемую ценность. Тем самым обеспечивается возможность подсчета в соответствии с международной практикой *извлекаемых*, а не геологических *запасов сырья* и, как следствие, вовлечения их в комплексное промышленное использование с максимальной прибылью, обеспечиваемой не принципом «коротких денег», а выпуском широкого ассортимента товарной продукции при минимальных отходах производства.

Накопленные (лежалые) и текущие техногенные образования, в отличие от исходного сырья, представляют собой *возобновляемые* минеральные ресурсы, не требующие затрат на добы-

чу, дезинтеграцию и транспортировку, обуславливающие основные издержки горнопромышленных производств. Они характеризуются повышенной извлекаемой ценностью за счет концентрации сопутствующих, наиболее ценных полезных компонентов, представленных неизвлеченными редкими, благородными и некоторыми цветными металлами или, наоборот, молотыми нерудными минеральными компонентами – полевошпатово-нефелиновыми, полевошпатовыми, различными слюдяными, кварцевыми и др. Для хвостов обогащения в целом характерна концентрация попутных особо ценных и токсичных микрокомпонентов, которые после извлечения главных промышленно-ценных приобретают значение ведущих. При химико-металлургической переработке минеральных концентратов происходит перераспределение элементов – «попутчиков» в промпродуктах, отходах и конечной профильной продукции с преимущественной концентрацией в различных узлах технологических схем и «элементопотоков». Шлаки, шламы и газопылевые выбросы как объемные отходы черной и цветной металлургии, содержащие повышенные концентрации полезных и токсичных макро- и микрокомпонентов, рассматриваются и оцениваются как техногенные химико-металлургические ресурсы. В России накоплено более 800 млн т шлаковых отвалов черной и цветной металлургии, которые занимают площади более 2,2 тыс. га. Ежегодно образуется порядка 100 млн т шлаков, среди которых преобладают шлаки доменного, сталеплавильного, литейного и ферросплавного производств. Все они обладают поликомпонентным составом, который определяется спецификой перерабатываемых минеральных концентратов, и существенно различаются содержаниями полезных и токсичных микрокомпонентов, сопутствующих Fe, Ti, Al, Cu, Ni, Zn, Pb как профилирующим видам металлургической продукции.

К сожалению, для России, в отличие от промышленно-развитых и развивающихся стран, характерна сложившаяся еще в советское время технологическая отсталость в глубокой и полной переработке минерального сырья и, тем бо-

лее, техногенных ресурсов, о чем свидетельствуют гигантские масштабы накопления последних предприятиями-ветеранами ГПК, ХМК и ТЭК и несоизмеримо меньшие объемы их переработки и использования. В нашей стране сложились устойчивые представления о том, что вовлечению техногенных ресурсов в промышленное использование препятствует отсутствие необходимых технологий и поэтому они представляют собой резерв будущего. Однако, портфель советских и российских, т. е. отечественных технологических разработок и решений, как фундаментальных, так и прикладных, остающихся невостребованными бизнесом и властью, последние 25 лет, вполне достаточен для ускоренного решения рассматриваемой задачи. В сложившихся условиях хронического недофинансирования и длительного «выживания» академической науки, а также фактической, за редким исключением, ликвидации отраслевой, содержание указанного портфеля отечественных инновационных технологий, в основном, остается неизвестным бизнесу и власти [1, 2, 3].

Научная общественность достаточно активно, особенно в последние годы, стремится привлечь внимание государства и бизнеса к назревшей необходимости решения проблем рационального недропользования, повышения эффективности производств, перерабатывающих минеральное сырье, и вовлечения в промышленное использование накапливаемых техногенных ресурсов. Помимо ежегодных семинаров Комиссии РМО по технологической минералогии, проводятся специализированные международные и всероссийские конференции, публикуются их материалы и научные статьи прикладного характера в центральных и региональных журналах геологических и технических ВУЗов, РАН, МПР и экологии РФ, осуществляются издания монографий, посвященных рассматриваемым проблемам [4]. К сожалению, за редким исключением, к проведению таких конференций, особенно Вузовских, не привлекаются представители горнопромышленных и сопряженных с ними перерабатывающих предприятий химико-металлургического и топливно-энергетического комплексов, специалисты которых в настоящее время представляют отраслевую науку. Обнадеживающим исключением явилось проведение в июне 2014 г. представительного Конгресса «Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований» научными и производственными организациями

Москвы и Урала в г. Екатеринбурге [1, 5] при активном участии и поддержке Уральской горно-металлургической компании (УГМК).

Среди научных организаций систематические разработки новых технологических решений, применительно к различным видам комплексного минерального сырья и техногенным ресурсам, преимущественно осуществляются научными специалистами центральных институтов РАН (ОИВТ, ИМЕТ, ИПКОН и др.) и корпораций «Ростехнологии» и ГИНЦВЕТМЕТ, «Росатома» (ВНИИХТ), а также региональных отделений РАН (ИХТРЭМС, ИМЕТ УрО и др.). В системе МПР и экологии РФ технологические исследования осуществляют единичные институты (ВИМС, ЦНИГРИ, ЦНИИГеолнеруд). Однако, последние, как правило, сводятся к изучению применимости ранее разработанных обогащительных способов и схем к новым объектам геологоразведки, количество которых значительно сократилось. Координация развития инновационных направлений в изучении состава и технологии переработки природного сырья и техногенных ресурсов осуществляется Комиссией по технологической минералогии Российского минералогического общества (РМО), объединяющей и анализирующей разработки центральных и региональных НИИ и ВУЗов.

В последние 2–3 года появились признаки обеспокоенности федеральных органов власти и некоторых корпораций ситуацией с накоплением отходов сопряженных производств ГПК, ХМК и ТЭК (Минэнерго, Минприроды и экологии, Госдума РФ).

С этих позиций автор надеется привлечь внимание, прежде всего, действующих ГОКов, ХМЗ и ТЭС к результатам собственных многолетних исследований проблем комплексного изучения, оценки и использования природного сырья и техногенных ресурсов с учетом состояния их изученности, возможностей и перспектив ускоренного вовлечения в промышленное использование с организацией выпуска широкого ассортимента конечной высоколиквидной продукции.

В настоящее время отсутствует универсальная геолого-промышленная классификация техногенных ресурсов, учитывающая их поликомпонентный состав, геохимическую специализацию и распределение по видам сопряженных обогащительных и передельных производств. Тем более отсутствует информация о приоритетных технологических направлениях их переработки и кадастры, как по видам сырья, так и по регионам



их размещения. В связи с этим нами предпринята попытка предварительной оценки сложившейся ситуации с привлечением необходимых данных по видам минерального сырья, добываемого и обогащаемого ГОКаами, подвергаемого химико-металлургическим переделам на соответствующих заводах, и используемого в качестве угольного топлива на российских ТЭС.

В конце прошлого века в практику геологоразведочных работ и оценки экологических последствий недропользования внедрены два новых раздела геохимии: поисковый и экологический. В настоящее время очевидна необходимость аналогичных разработок нового раздела прикладной геохимии – *техногеохимического* [6]. В структуре геоэкологии этот раздел рассматривается нами как поисково-информационный применительно к задачам технологической минералогии и техноэкологии, инновационное развитие которых предшествует разработкам методов подземно-дистанционной геотехнологии XXI в. С современных позиций системное использование возможностей техногеохимии позволяет одновременно решать задачи выявления и извлечения особо ценных и экологически лимитируемых микрокомпонентов, совокупность которых, как правило, не учитывается геологоразведкой и, тем более, в процессе эксплуатации месторождений природного сырья и техногенных ресурсов.

Методология комплексной оценки техногенных ресурсов должна включать поликомпонентное эколого-геохимическое картирование, изучение распределения особо ценных и токсичных компонентов в материальных потоках производств ГПК, ХМК и ТЭК, составление поминеральных балансов их распределения в узлах концентрирования и необходимые технологические испытания и разработки с использованием схемы: Геоэкология – *Техногеохимия* – *Технологическая минералогия* – *Техноэкология* – Геотехнология (дистанционная).

Для изучения и оценки техногенных ресурсов в качестве сырья автором разработана и рекомендуется следующая методическая схема (рис. 1).

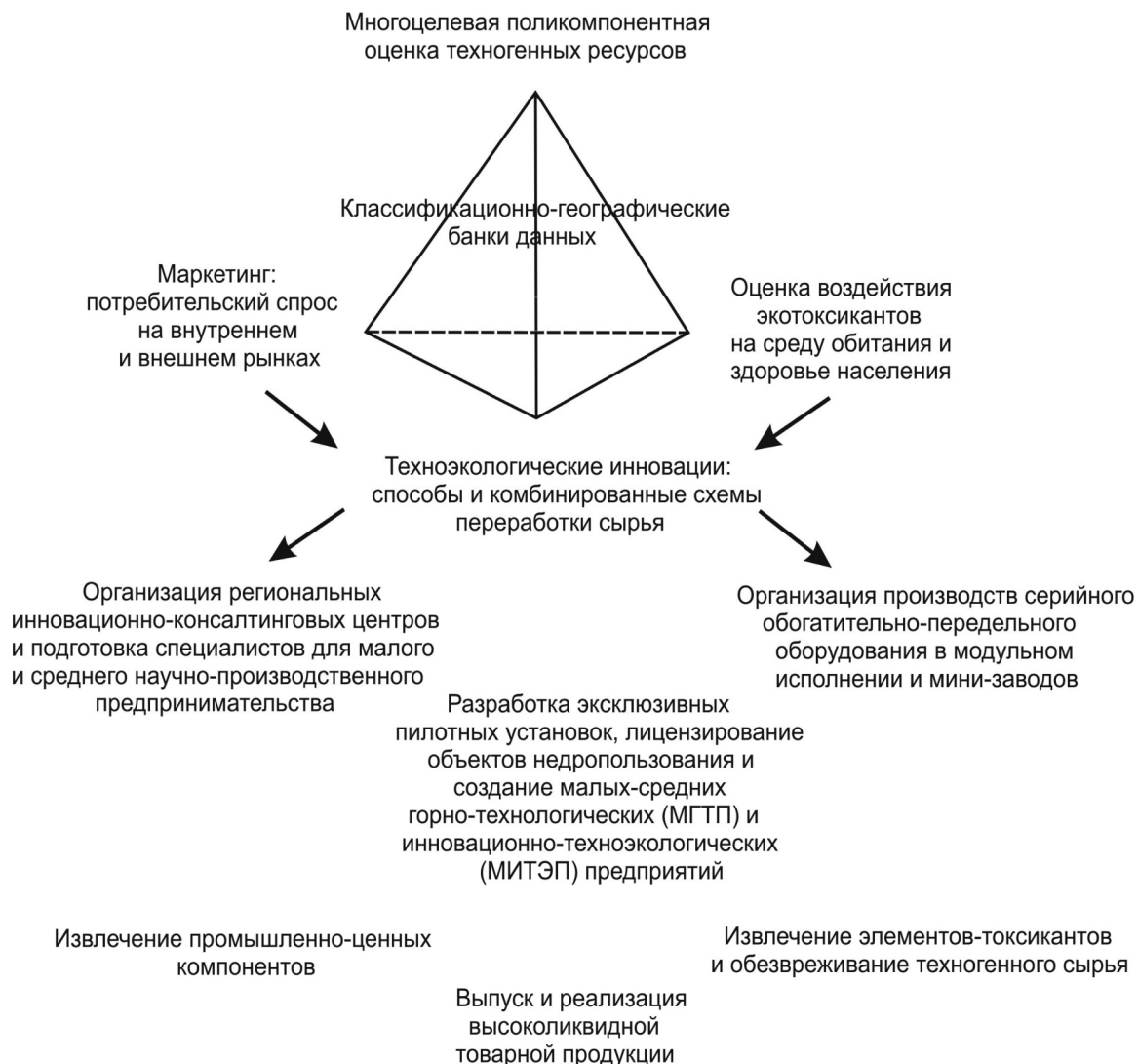
По результатам количественно-минералогического изучения нерудных фракций и обобщения соответствующих материалов по редкометальным ГОКаам в 70-х годах нами совместно со специалистами ИМГРЭ и ЦНИИгеолнеруда (г. Казань) были разработаны рекомендации для Минпромстройматериалов о необходимости организации полномасштабного выпуска молотых К-Na-х полевошпатово-нефелиновых, поле-

вошпатовых, слюдяных и кварцевых концентратов на базе редкометальных ГОКов, которые по своей инициативе уже начали выпуск и реализацию попутной нерудной продукции в объемах до десятков тыс. т (Белогорский, Забайкальский, Вишневогорский ГОК`и). Тем самым были обоснованы возможности сокращения отраслевых затрат в указанном Министерстве, вплоть до прекращения строительства Ёнской фабрики на нерудном пегматитовом сырье в Кольском регионе.

В связи с задачами возрождения и развития в новой России приостановленных и утраченных редкометальных производств необходимо иметь в виду, что за рубежом в равной степени развиваются обогатительные производства профилирующих редкометальных (США, Канада, Зимбабве, Австралия и др.) и молотых нерудных концентратов (Норвегия, Финляндия, Канада), а также добыча редкометального и нерудного сырья ручной рудоразборкой (страны Африки). При возобновлении производственной деятельности редкометальных ГОКов и освоении новых месторождений необходимо учитывать все категории извлекаемых запасов профильных и сопутствующих полезных компонентов, остающихся в недрах, включая забалансовые, особую роль нерудных компонентов в извлекаемой ценности, доля которых достигает 50–70 %, и перспективы вовлечения в промышленное использование накопленных и ожидаемых техногенных ресурсов.

В настоящее время ОАО «Малышевское рудоуправление» (Ср. Урал) эксплуатирует отвалы обогащения пегматитового сырья с Ta-Nb-Be-оруденением, отработанного на редкие металлы месторождения «Липовый лог», и выпускает молотые К-Na-е полевошпатовые и мусковитовые флотационные концентраты. Их потребителями являются более 50 предприятий-производителей стекло-керамической продукции. Примечательно, что нашими исследованиями в советский период отходов обогащения гранит-пегматитового калиевополевошпатового сырья Лянгарского месторождения в Узбекистане было обнаружено накопление в тяжелой электромагнитной фракции 70 г/т колумбита, а Лолабулакское поле и месторождение керамических пегматитов было переоценено как редкометально-керамическое с промышленными содержаниями берилла, танталит-колумбита и танталсодержащего касситерита. Эти месторождения до сих пор являются источниками концентратов к.п.ш. для фарфоровых заводов Узбекистана.

# **Принципиальная методическая схема многоцелевого изучения, оценки и использования техногенных ресурсов**



*Рис. 1. Принципиальная методическая схема многоцелевого изучения, оценки и использования техногенных ресурсов*

Следует также иметь в виду обоснованные нами в 70–80-е годы прошлого столетия инновационные технологические возможности организации производств новых композитных материалов из накопленных редкометальных и нерудных «отходов» пегматитового сырья – например, литиевого фарфора, специальных видов керамики и стекол с добавками природных редкометальных модификаторов, повышения эффективности глиноземно-алюминиевых производств за счет добавок в шихту литиевых минеральных концентратов и т. д.

## **Техногенные ресурсы горно-химических производств**

Эти производства минерально-химической продукции выделяются суперкрупными масштабами накопления отходов горной добычи – пород вскрыши и выработанного пространства, хвостов обогащения и химической переработки минеральных концентратов – апатитовых, карналлитовых, галитовых, датолитовых и др. Для них характерна повышенная растворимость как исходного сырья, максимальная для хлоридно-солевых месторождений, так и породообразую-



щих минералов силикатно-фосфатных руд (нефелин и др.). В первом случае очевидны геоэкологические риски, связанные с искусственным карстообразованием, провалами земной поверхности в выработанные подземные пространства и интенсивным загрязнением хлоридами водоемов и водотоков (районы гг. Березняки – Соликамск). На рудниках корпорации «Уралкалий» ежегодно образуется и складировается 16–18 млн т солей и 3 млн т глинисто-солевых шламов при выпуске концентрата из сильвинит-карналлитового сырья. Высокая пористость и растворимость отвалов высотой 50–80 м и площадью по 10–15 га каждый обуславливают катастрофические провалы и оползни объемом 100–300 тыс. м<sup>3</sup>. С другой стороны, помимо традиционной химической продукции, из карналлитовых рассолов в советское время осуществлялось попутное извлечение редких щелочных металлов – рубидия и цезия. Очевидно, что при освоении новых крупных соляных месторождений в Поволжье должны учитываться как их геоэкологическая специфика с разработками комплекса профилактических природоохранных мер безопасности, так и возможности попутного извлечения сопутствующих химических продуктов и редких металлов.

Наиболее высококомплексные и ценные «отходы» связаны с производствами фосфатных минеральных удобрений из Хибинского редкометалльно-глиноземно-фосфатного сырья. При этом в лаборатории бетонов ИХТРЭМС КНЦ РАН разработаны технологии многоцелевого использования пород вскрыши и силикатной части отходов ОАО «Апатит» и других предприятий Кольского ГПК, а также золы местных ТЭС в производствах нетрадиционных строительных и новых технических материалов [8, 9, 10]. Однако, максимальной извлекаемой ценностью с химико-металлургических позиций обладают концентраты апатита, нефелина, минералов титана и эгирина, селективный выпуск которых из исходного сырья подготовлен технологами ОАО «Апатит», но пока sporadически осуществляется только на уровне пилотных проектов из-за отсутствия потребительского рынка [11]. Исключением являются профильные нефелиновые концентраты, которые поставляются на заводы Волховско-Пикалевского объединения в объемах до 0,8 млн т/год в качестве глиноземного сырья с побочным производством из остаточных белитовых шламов портландцемента. Следует заметить, что в советское время разнообразная химическая продукция,

получаемая из нефелина, обеспечивала производства более 50 предприятий.

В настоящее время объемы накопления хвостов обогащения ОАО «Апатит» достигают 1 млрд. т и продолжают увеличиваться. Преобладающий объем в них представлен неизвлекаемым нефелином (с калиевым полевым шпатом), концентраты которых в указанных объемах используются в качестве источника галлия и могут служить также источниками рубидия (165 г/т) и цезия. В товарном и недоизвлеченном апатите содержатся редкие земли (30 кг/т), стронций (10 кг/т) и фтор (30 кг/т), а в неизвлекаемом титаномагнетите – ванадий (1 кг/т), в сфене – ниобий (3 кг/т) и тантал (200 г/т). Все указанные редкие металлы в составе минеральных концентратов и отходов обогащения с 30-х годов прошлого столетия не извлекаются и накоплены в хвостохранилищах, которые представляют собой *суперкрупное* техногенное образование, требующее комплексной ресурсно-экологической оценки в качестве месторождения высококомплексного техногенного сырья.

В то же время очевидна экологическая опасность этих хвостохранилищ для среды обитания за счет их пыления в сухую погоду, sporadически накрывающего г. Апатиты, и сточных вод – фильтратов обогатительной пульпы, проникающих в подземные водоносные горизонты и отгороженную дамбой из обогатительных песков акваторию оз. Имандра. Годовые выбросы пыли с хвостохранилища АНОФ-2 оцениваются в 170 млн т/год. Многолетние попытки закрепления пылящих поверхностей хвостохранилищ латексом и битумами не увенчались успехом, а более эффективное закрепление растительным покровом, согласно опыту рекультивации небольшого старогоднего хвостохранилища первой, ныне не существующей, обогатительной фабрики, требует длительного времени и невозможно на участках размещения отстойников-накопителей. Существующая система очистных сооружений не обеспечивает полноценную химическую очистку как рудничных промстоков, так и обогатительных, освобождая их преимущественно от механических взвесей. Геолого-геохимический мониторинг за составом сбросов осуществляется в пределах земельных отводов ГОКа, что исключает объективную оценку их воздействия на среду обитания.

Поэтому радикальное решение геоэкологических проблем рассматриваемых отходов ОАО

«Апатит» возможно путем вовлечения их в промышленную переработку с использованием инновационных технологий, вплоть до ликвидации сначала текущих поступлений, а затем и лежащих накоплений. При этом могут быть использованы кислотные и термохимические инновации, разработанные и рекомендуемые специалистами ИХТРЭМС КНЦ РАН и ОИВТ РАН применительно к глубокой переработке как селективных минеральных концентратов, так и хвостов обогащения физико-химическими методами. Тем самым может быть решена проблема экологизации и коммерциализации основного производства ОАО «Апатит» и рекомендуемых побочных путем использования инновационных технологий, получения и реализации новых видов высоколиквидной продукции и устранения экологически лимитируемых компонентов, включая природные радионуклиды, из процессов переработки исходного и техногенного сырья.

*Фосфогипс* как объемный отход *сернокислотной* переработки хибинского апатита заводами минеральных удобрений корпорации «ФосАгро» давно привлекает внимание научных специалистов как техногенный ресурс строительной индустрии и производств редких металлов [12]. Содержания стронция, редких земель и фтора в нем несколько ниже, чем в исходном сырье, но достаточны для их извлечения с получением химических концентратов. В то же время фосфогипс содержит торий и уран, остаточную серную кислоту и новообразованную фосфорную. Хранилища его под открытым небом и, как правило, вблизи крупных водоемов (Балаковский и Волховский заводы, «Аммофос» и др.) представляют собой «белые горы», подверженные распылению ветром, промывке и дополнительному загрязнению атмосферными осадками и паводковыми водами. При объемах накопления фосфогипса в хвостохранилищах «ФосАгро» от 45 до 130 млн т пылевое и водное загрязнение среды обитания указанными, в том числе – экологически лимитируемыми компонентами обнаружено в радиусе  $\geq 30$  км.

Исследования в ИГЕМ РАН образцов фосфогипса (свежего и лежалого) из отвалов БМУ позволили впервые выявить в среднетяжелой ( $2,3\text{--}2,8$  г/см<sup>3</sup>) и тяжелой ( $>3$  г/см<sup>3</sup>) минеральных фракциях фосфогипса новые, совершенно уникальные минеральные образования [13]: а) мелкочешуйчатые (снеговидные) выделения стронцийсодержащего гипса на крупных кристаллах

минералов (гипса, кварца, сфена и эгирина) с содержанием стронция от 1,3 до 4,73 %; б) мелкие коллоидные выделения также на более крупных кристаллах разных минералов, в химическом составе которых установлены редкие металлы – стронций (до 18–20 %) и церий (от 1,5 до 2,2 %); в) мелкокристаллические игольчатые и нитевидные новообразования редкоземельного сульфата стронция ( $\text{Sr}(\text{Ce}, \text{La}, \text{Nd})\text{SO}_4$ ) с содержанием стронция от 23,3 до 35,6 %, церия – 1,1–2,8 %, лантана – 1,71–1,78 % и неодима до 1,42 % – техногенный редкоземельный целестин; г) скрытокристаллическая минерализация, условно диагностируемая как редкометалльный фосфат-силикатный гель с содержанием фосфора 9,3–16,2 %, стронция до 12,2 % и РЗЭ (La, Ce, Nd до 22 %). Выявление новообразованных и, возможно, видоизменяющихся в условиях складирования минеральных фаз фосфогипса позволяет положительно оценивать перспективы создания безотходных технологий его комплексной переработки.

В настоящее время в связи с дефицитом гипса в России как стройматериала и производств редких земель ООО «ЛИТ» и группа компаний «Скайград» (г. Королев) реализуют технологическую разработку получения из фосфогипса товарного гипса и химических редкоземельных концентратов [14] – коллективного и селективных (по группам).

Разработчикам этой технологии нами рекомендованы меры по обеспечению стабильности состава текущего и в перспективе – лежалого фосфогипса, оценка уровней радиоактивности сырья и конечной продукции с определением соотношений тория и урана, проведение маркетинговых исследований на редкоземельные концентраты и инновационную продукцию (изделия) с их использованием, а также разработка технологии сопутствующего получения стронциевых продуктов. Пилотные испытания технологии получения обезвреженного гипса и редкоземельной продукции «Скайград» планирует завершить опытно-промышленными и организацией производства типовых модулей для тиражирования выпуска ожидаемых дефицитных и особо ценных продуктов, включая изделия с использованием РЗМ. В настоящее время ООО «ЛИТ» производит и демонстрирует опытные образцы высоколиквидной редкоземельной продукции – групповых концентратов РЗМ среднетяжелой группы и дидима, высокочистых оксидов церия, неодима



и лантана, осуществляет автоматизацию управлением и контролем производства и т. д. [14].

Приведенные данные о суперкрупных объемах накопления высококомплексных техногенных ресурсов предприятиями корпорации «ФосАгро», в значительной степени унаследованных от их деятельности в структуре Минхимпрома СССР, свидетельствуют о том, что с 30-х годов прошлого столетия сложившаяся негативная ситуация с отходами производств фосфатных удобрений в нашей стране не только не исправляется, но, наоборот, усугубляется. В связи с возникшей в 2011–2012 гг. задачей ускоренного возрождения отечественных производств редких земель, неизвлекаемых как из апатитовых концентратов, так и фосфогипса при сопоставимых содержаниях, возникают вопросы о потерях и недопустимом расточительстве, допускаемом руководством корпорации в последние десятилетия не только с позиций упущенной выгоды, но и государственных интересов. Действительно, ежегодно при погашении добытой части запасов фосфатного сырья допускается одновременное списание запасов содержащихся в нем редких земель, стронция и других редких металлов, утвержденных ГКЗ СССР и РФ. В то же время в составе экспортируемых апатитовых концентратов утрачиваются указанные редкие металлы и фтор, извлечение которых организовано странами-импортерами апатита (Норвегия, Польша, Германия и др.). Между тем, качество добываемого апатитового сырья по мере углубления эксплуатационных горизонтов ухудшается за счет снижения содержаний  $P_2O_5$  и повышения лимитируемых компонентов (от титана до радионуклидов). Соответственно, возрастает себестоимость как апатитовых концентратов, так и конечной фосфатной продукции из-за необходимости их рафинирования на стадиях обогащения и передела. Со снижением содержаний и ухудшением качества профильного продукта происходит увеличение объемов отходов добычи и передела при одновременном росте расходов на содержание переполненных хвостохранилищ и создание новых.

В этой ситуации появление в Хибинском горнопромышленном районе нового недропользователя ОАО «СЗФК» корпорации «Акрон» как конкурента ОАО «Апатит» «ФосАгро» позволяет надеяться и на изменения в обращении с «отходами» фосфатных производств. Как известно, ОАО «Акрон», в отличие от «ФосАгро», перерабатыва-

ет 15 % добываемого апатита по *азотнокислотной* схеме, которая в принципе позволяет создать практически безотходное производство на базе с 2012–2013 гг. на базе собственного апатитового сырья после ввода в эксплуатацию месторождения Олений ручей, а затем – Партомчорра на флангах «Хибинской дуги». По качеству эти месторождения уступают эксплуатируемым ОАО «Апатит», но лицензией на право недропользования предусмотрено получение нефелиновых концентратов, что существенно повышает рентабельность новых производств (Олений ручей – Великий Новгород). ОИВТ РАН, в развитие традиционных технологий, внедряемых ИХТРЭМС РАН на обогатительной фабрике «СЗФК», предложил ОАО «Акрон» выполнение прогнозно-оценочных по многоцелевому опережающему минералогическому картированию продуктивных горизонтов до их отработки, т. е. по скважинам эксплоразведки на широкий круг полезных и лимитируемых с технологических и экологических позиций элементов. Предложена также пилотная апробация инновационной термохимической разработки ОИВТ РАН по комплексной переработке коллективных титановых концентратов с получением титановых и сопутствующих высоколиквидных продуктов и т. д. Есть основания полагать, что создание каскадной обогатительно-передельной схемы глубокой переработки редкометалло-глиноземно-фосфатного сырья с месторождений ОАО «Акрон» послужит «спусковым механизмом» для активизации НИР и НИОКР на ОАО «Апатит» и заводах минеральных удобрений в направлениях комплексного использования исходного сырья и ликвидации отходов обогащения и сернокислотного передела, обеспечивающего 85 % получения фосфатной продукции.

#### **Техногенные ресурсы производств цветной металлургии**

Предприятия цветной металлургии значительно уступают чернометаллургическим по объемам накопления отходов обогащения и особенно – переделов, но превосходят их разнообразием и уровнями концентрации сопутствующих особо ценных и экологически лимитируемых компонентов, представляющих потенциальную коммерческую ценность и реальную опасность для среды обитания. В этой подотрасли известны немногочисленные примеры доизвлечения профилирующих металлов и извлечения сопутствующих, включая организацию инновационных побочных производств.

Согласно оценкам ИПКОН РАН, доля недоизвлеченных из исходных руд цветных металлов составляет (%): Cu 15–25, Zn 26–47, Ni 10–25, Pb 25–39, Mo 19–23, Sn 35–58, W 35–50. Эти потери, обусловленные несовершенством преимущественно обогащательных технологий прошлых десятилетий, обусловили накопление недоизвлеченных и неизвлекавшихся металлов в отходах цветной металлургии на начало 2000-х годов по официальным данным в следующих количествах (тыс. т): 9000 Zn, 2480 Ni, 980 Pb, 114 Mo, 540 Sn, 129 W. Для россыпных месторождений золота его потери при добыче составляют от 10–15 до 50 %, в связи с чем в Магаданской области до 70 % эксплуатируемых месторождений являются техногенными. Среди оцененных и учтенных Госбалансом РФ техногенных месторождений преобладают золоторудные – 100, в то время как количество железорудных (17), меднорудных (7), вольфрамовых (6) значительно меньше. Минимальное количество техногенных месторождений (от 1 до 4-х) учтено для Zn, Pb, Mo, S, As, платиноидов, редкоземельных и рассеянных редких металлов [4]. Последнее обстоятельство наглядно иллюстрирует давно назревшую необходимость инвентаризации природных и техногенных ресурсов таких промышленно-ценных и дефицитных металлов как Re, In, Cd, Ge, Ga, Tl, Se, Te, Bi, которые либо не учитывались на стадиях ГРП и подсчета запасов профилирующих цветных металлов, либо накоплены при извлечении последних в отходах обогащения и переделов.

Наглядным примером переработки накопленных отходов обогащения в цветной металлургии является организация выпуска недоизвлеченных вольфрамовых концентратов из хвостов бывшего Джидинского молибденово-вольфрамового комбината в Забайкалье. В 2-х хвостохранилищах было накоплено более 40 млн т отходов обогащения, соответственно, молибденитового и сульфидно-вольфрамитового (гюбнеритового) сырья. Согласно исследованиям специалистов ЦНИГРИ (1980–1989 гг.) и Геологического института СО РАН (1991–2007 гг.) насыпное и намывное хвостохранилища содержат значительное количество недоизвлеченных промышленно-ценных минералов – молибденита (до 200 г/т), гюбнерита (600–1500 г/т) и шеелита (400–1200 г/т), а также сульфидов Cu, Zn, Pb (5–10 кг/т), Bi (1 кг/т), преобладающего пирита – 30 кг/т и золота, приуроченного к участкам скопления сульфидов. В настоящее время эти лежалые хвосты

служат объектом предпринимательской эксплуатации (г. Закаменск) исключительно на вольфрам. Результаты наших экспериментов с использованием ликвационной плавки подобных же отходов Спокойнинской фабрики бывшего Орловского ГОКа в В. Забайкалье, позволившие получить плавленные концентраты Ta и Nb, Pb с Bi и Ag, позволяют рекомендовать испытания этого способа извлечения сопутствующих компонентов и для техногенного сырья Джиды [15].

Наиболее известным примером попутного извлечения особо ценных микрокомпонентов в процессе химико-металлургических переделов является побочное производство благородных и некоторых рассеянных редких металлов в ОАО «ГМК Норникель» из медно-никелевого сырья. Помимо выпуска в г. Норильске профилирующих Cu, Ni, Co, предприятием организован выпуск сопутствующих им Au, Ag, палладия и других платиноидов на Красноярском заводе цветных металлов. Тем самым, т. е. за счет сопутствующей особо ценной продукции, обеспечивается рентабельность основных производств корпораций, выпускающих Cu, Ni, Co, и прибыль ее заполярных предприятий в Норильске.

Прогнозные ресурсы платиноидов в хвостах обогащения «ГМК Норникель» оценивались в 2007 г. в 800–1000 т при ежегодном приросте этих ресурсов до 35 т, что в 5 раз больше их извлечения из рудного сырья России. Эти хвосты представляют собой искусственную россыпь, обогащенную минералами-концентраторами Cu, Ni, Au, Ag и платиноидов.

Однако, и в Норильске и на предприятиях Кольской ГМК той же корпорации не используются ресурсно-технологические возможности получения *рассеянных редких металлов* в качестве дополнительной продукции. В частности, согласно нашим исследованиям твердых и жидких промпродуктов ОАО «ГМК Североникель» на пробах ОТК предприятия (г. Мончегорск), выполненных в середине 90-х годов совместно с Л. М. Делицыным, были обнаружены повышенные концентрации в некоторых из них как недоизвлеченных Cu, Ni, Co (в шлаках электропечей, конвертерных пылях, промстоках и шламах), так и особо ценных и токсичных «спутников» – Cd (420–500 г/т), Bi (300–400 г/т), Sb (280–300 г/т), Ge (50–100 г/т), Tl (50–100 г/т), In (10–100 г/т), а также As (8–11 г/т), Pb (1–10 г/т), Sn (180–1000 г/т), Mo (>300 г/т), W (>1 кг/т) – в конвертерных пылях и шламах серноокислотной промывки;



кроме того, оказались характерными высокие содержания Se, Te, Au, Ag (10–100 г/т) и платины (10 г/т). Более того, специалистами ИХТРЭМС КНЦ РАН (г. Апатиты) на том же предприятии разработана инновационная технология совместного извлечения рения, осмия и селена из промывной серной кислоты, содержащей 2–15 мг/л Re и 3–10 мг/л Os, и из сливов газоотходов (1–10 мг/л Re и 15–20 мг/л Os и 0,5–1,0 г/л Se). Фильтрат, полученный после выведения осмий-селенового концентрата из сливов газоотходов, объединяется с раствором промывной  $H_2SO_4$  и далее методами экстракции-реэкстракции используется для последовательного выделения регенерированной серной кислоты и индивидуальных соединений рения и осмия [16]. Однако, до сих пор этот заводской «Клондайк» рассеянных редких и благородных металлов не освоен предприятиями Кольской ГМК, входящей в корпорацию «Интеррос» – «Норникель».

Тем самым открываются технологические возможности и экономические перспективы получения *рения как стратегического металла XXI века*, используемого в сверхжаропрочных сплавах и нефтехимических катализаторах, не только из возгонов обжига молибденитовых концентратов, но и из отходов пирометаллургической переработки медно-сульфидных концентратов.

Такие возможности и перспективы представляются реальными и для *уральских предприятий ГПК и ХМК*, перерабатывающих сырье медно-сульфидных месторождений, а в обозримом будущем – и медно-порфириновых, обогащенных молибденом и рением (Михеевское и др.). Тем более, что эта проблема уже была решена в СССР, который производил до 10 т рения. В настоящее время его главным производителем в странах СНГ за счет переработки меднорудного сырья Джезказгана стал Казахстан, занимающий второе место в мире по объемам выпуска рениевого продукта (8,5 т/год) после Чили при объемах более 50 т. При этом извлечение рения в медный концентрат составляет порядка 50 %, а в технологические газы медных производств – 70–72 %. Стоимость единицы товарной рениевой продукции как минимум в 2600 раз дороже медной [17, 18].

Доля меди и цинка в суммарной извлекаемой ценности обогатительных и металлургических ресурсов предприятий Урала составляет примерно 30 %, в то время как преобладающие 70 % представлены сопутствующими особо ценными и токсичными микрокомпонентами (Cd, Co, Ge,

Ga, Bi, Tl, In, возможно Re и др.). При этом максимальная стоимость Re, In, Ge, Ga существенно превосходит уровни мировых цен на Te (в 3–10 раз) и особенно на Se, Bi, Rl, Cd (на 2 порядка). Даже высокотоксичные мышьяк и ртуть оцениваются на Лондонской бирже металлов, соответственно, в 9 тыс. евро/кг и 510 тыс. евро/кг.

Эти данные, включая предварительную поликомпонентную характеристику отходов обогащения меднорудных ГОКов Урала, ориентируют на организацию специализированного *программного* изучения содержаний особо ценных и токсичных микрокомпонентов и минеральных форм их концентрации в техногенных ресурсах конкретных ГОКов и МПЗ с составлением балансов распределения в материальных потоках производства. Пока такая информационная основа отсутствует, что препятствует инвестированию со стороны бизнеса и власти в переработку отходов обогащения и переделов Уральского сульфидного сырья с извлечением его наиболее ценных компонентов и одновременно – устранением из технологических процессов и продуктов экологически лимитируемых ингредиентов. Масштабы накопления рассматриваемых техногенных ресурсов с недоизвлеченными и особенно неизвлекаемыми при обогащении и переделах особо ценными и токсичными компонентами обуславливают значительные размеры упущенной выгоды для предприятий и их владельцев, отсутствие редкометальной продукции у государства, необходимой для ОПК и инновационного промышленного развития, а также продолжающееся многие десятилетия химическое загрязнение среды обитания (например, многокилометровая зона Карабашских обогатительных и медеплавильных производств и их отходов).

В частности, в отходах обогащения Учалинского ГОКа, согласно оценкам специалистов, накоплено до 140 тыс. т меди, 350 тыс. т цинка, более 70 т золота, до 1000 т серебра, а также Bi, In, Ge, Ga, Cd и другие промышленно-ценные микрокомпоненты. С другой стороны, организованная на Среднеуральском медеплавильном заводе (СУМЗ) переработка шлака в объемах 1 млн т/год обеспечивает ежегодно получение 3 тыс. т Cu, 0,2 т Au, 5 т Ag. **Запасы** шлаков, накопленных СУМЗ в течение 65 лет в процессе переработки медно-цинковых концентратов с Дегтярского, Сибайского, Учалинского, Гайского и Гумешевского месторождений, оценены в 18,952 млн т, что позволяет в течение

19 лет извлечь 125 т Cu, 5,17 т Au, 104 т Ag, подсчитанных по категории C<sub>2</sub> [4]. Площадь шлакохранилища составляет 42 га, высота в среднем около 10 м. Содержания тонковкрапленной металлической меди в шлаках отражательных печей – 80 %, а в конвертерных шлаках – 50 % с переменными количествами 3–5 минералов-концентраторов меди и сфалерита (в стеклофазе). Ежегодный объем переработки шлака СУМЗ в 2 раза превышает его поступление в отвал.

Общее количество шлаков, накопленных медеплавильными заводами Урала, оценивается в 110 млн т. В них сосредоточено более 350 тыс. т меди (со средним содержанием 0,37 %) и 210 тыс. т цинка, порядка 7 т золота (0,26–1,9 г/т), 150 т серебра (3,4–26,0 г/т), 115,3 т Ge (2,4–3,8 г/т), 153,4 т In (8,5–44 г/т), Bi (9,7–20 г/т), 519 т Cd (0,2–5,9 г/т), 99 т Se (0,6–3,85 г/т), 135,7 т Te (3–3,5 г/т), а также As (70–500 г/т), другие ценные и токсичные «попутчики» [19].

Приведенные данные свидетельствуют о необходимости дифференцированного изучения и оценки как шлаков, так и других отходов медеплавильных заводов на особо ценные рассеянные редкие и благородные металлы. Сравнительный анализ их содержаний в шлаках производств довоенного периода, 80–90-х годов прошлого столетия и современных, позволяет оценивать перспективы их коллективного и селективного извлечения в зависимости от исходного состава рудного сырья, добываемого каждым предприятием, и достигнутых технологических показателей его переработки. В частности, на Среднеуральском заводе содержания Sb и Ga в ассоциации с Bi, In, Cd и Ge в современных шлаках достигли уровней промышленно-ценных компонентов, требующих извлечения. Для шлаков Кировоградского завода в целом характерна подобная тенденция, особенно в сравнении с довоенным периодом, для которого, наоборот, характерны максимальные концентрации индия и галлия. Эти примеры наглядно свидетельствуют о необходимости *сочетанного* мониторинга микрокомпонентного состава как лежалых и текущих хвостов обогащения с составлением минеральных балансов распределения рассматриваемых компонентов, так и шлаков, складированных и текущих, в целях выбора техногенных ресурсов наиболее перспективных для извлечения полезных и токсичных микрокомпонентов.

*Газопылевые выбросы, кеки, шламы и промывочные растворы* цветной металлургии пред-

ставляют собой поликомпонентные продукты высокотемпературных процессов (1000–1300 °C) плавки и обжига минеральных концентратов Cu, Zn, Pb, Sn, Mo и других металлов. Наиболее объемными являются процессы выплавки алюминия из глиноземных концентратов. Для промпродуктов и «отходов» цветной металлургии характерна исключительная контрастность распределения в них особо ценных и токсичных микрокомпонентов. Для переработки сульфидного сырья характерна избирательная концентрация редких и благородных металлов в передельных продуктах и «отходах», где их содержания превышают уровни, характерные для исходных руд и концентратов. Такие «узлы» сложных технологических схем и процессов, согласно мировой практике, служат объектами промышленного извлечения рассматриваемых микрокомпонентов.

Известно, что *рений* накапливается в растворах очистки газов обжига медных концентратов до 15–300 г/м<sup>3</sup> и пылях свинцового производства – 500 г/т, *германий* – в пылях медеплавильных заводов и кеках цинкового производства – 0,1–0,5 % (1–5 кг/т), *кадмий* – в пылях свинцового и медного производств – 2–5 % (20–50 кг/т), *индий* – в продуктах гидрометаллургической переработки пылей и возгонов цинка и свинца с концентрацией в растворах 90–500 г/м<sup>3</sup> и осадках – 0,1–0,2 % (1–2 кг/т), *таллий* – в растворах выщелачивания пылей агломерации, плавки и фьюмингования свинцового производства – 100–600 г/м<sup>3</sup> и дрессах рафинирования чернового кадмия – 5–7 % (50–70 кг/т) и т. д.

*Пиритные концентраты и огарки* представляют собой ценные виды техногенных минерально-химических ресурсов, складированных ГОКаами при обогащении сульфидного медно-цинкового и свинцово-цинкового сырья и, соответственно, накопленных химико-металлургическими предприятиями в период производства серной кислоты за счет переработки исходного пиритного сырья. Оба вида ресурсов обогащены железом и серой, цветными (Cu, Zn, Pb, Co, Sb и др.), благородными (Au, Ag) и рассеянными металлами (Se, Te, Bi, Cd, Tl и др.), включая токсиканты 1-го и 2-го классов опасности. Последнее обстоятельство с учетом интенсивной окисляемости и разложения пиритного сырья как источника образования слабых серноокислотных растворов в условиях гипергенеза обуславливает определенную экологическую опасность его складирования и длительного хранения. Пиритные

огарки как отходы бывших сернокислотных производств в настоящее время сосредоточены в 4-х наиболее крупных хранилищах объемом более 1 млн т каждое: ОАО «Аммофос» (г. Череповец) – 12 млн т, Мелеузский завод минеральных удобрений – 2,5 млн т, разведанное Кировоградское месторождение – 7 млн т, ОАО «ППГХО» (г. Краснокаменск) – 4,5 млн т, т. е. в сумме – 26 млн т. Потребителем пиритных огарков в настоящее время является только цементная промышленность, хотя задача их использования в качестве комплексного источника металлопродукции ставилась с конца 30-х годов прошлого столетия. Согласно исследованиям А. И. Заболоцкого пиритные огарки содержат 1,1–2,1 г/т золота, 20–30 г/т серебра, 0,3–0,4 % меди, 0,7–1,0 % цинка и 40–50 % железа, а с их поставками на цементные заводы ежегодно утрачивается 0,5 т золота. В частности, за 50 лет на Новороссийские заводы в составе пиритных огарков отправлено до 10 т золота [20, 21].

Инновационные технологические решения проблемы вовлечения в комплексное использование пиритных огарков в качестве источника золота и сопутствующих полезных компонентов осуществляются в 2-х направлениях: кучного выщелачивания меди и золота из штабеля хранилища огарков в г. Мелеузе (ЗАО НПФ «Башкирская золотодобывающая компания») и комбинированного подземно-кучного выщелачивания на месте залегания из техногенного Кировоградского месторождения (ОАО «Уралэлектромедь»). В последнем случае разработана и апробирована двухстадийная технология: для извлечения меди – с использованием подземных слабокислых «рас-солов» техногенного водного горизонта месторождения с содержаниями 1,2 г/л Cu и 0,7 г/л Zn, а затем – извлечение золота с применением тиокарбоамидного метода [19]. Утвержденные ГКЗ запасы Au, Ag, Cu и Zn Кировоградского месторождения эквивалентны 13 т золота (от содержаний 4,5 г/т условного золота). Себестоимость золота на данном геотехнологическом объекте предстоящей эксплуатации обоснована на уровне 500–600 руб./т. Определенный интерес к этой технологии, обеспечивающей извлечение даже из «упорных» руд до 80 %, проявило ОАО «ППГХО» (г. Краснокаменск), включая подключение в качестве партнера добывающей компании «Ауриант Майнинг» [21].

Необходимо заметить, что извлечение Zn и Ag из слабокислых растворов не превышает 30 %, но

бактериальная обработка огарков позволяет поднять его соответственно до 72 и 84 %, вплоть до получения товарного цинкового концентрата для металлургических производств. Концентрация железа в остаточных шламах выщелачивания позволяет рассчитывать на их использование в черной металлургии в качестве сырья, пригодного для прямого восстановления и получения губчатого железа.

С учетом отечественных инновационных разработок и зарубежного технологического опыта переработки пирита и пиритных огарков, можно рассчитывать не только на их переработку в местах складирования, но и на организацию экспорта – например, с Урала, Забайкалья и Дальнего Востока – в Японию, где на заводе «Тобато» ежегодно перерабатывалось 250 тыс. т пиритного концентрата, содержащего 1 % г/т Au; 10 г/т Ag; 0,33 % Cu; 0,55 % Zn и 50 % серы, по обжигово-хлоридно-возгонной схеме. Извлечение золота и серебра составляло (%) по 63, меди – 78, цинка – 60, серы – 95,2. Содержание железа в обожженных окатышах – 61,9 % [22].

Тем самым намечены конкретные пути решения задач не только использования пиритных огарков в качестве источника золота и другой металлопродукции, но и полной их ликвидации как источников экологического неблагополучия.

#### **Техногенные ресурсы производств черной металлургии**

Эти суперкрупные и крупные ресурсы представлены породами вскрыши, отходами обогащения и металлургических переделов различного железорудного сырья: железистых кварцитов (месторождения КМА, Костомукшинское, Оленегорское), магнетитовых скарнов (Магнитогорская группа), титаномагнетитовых руд (Качканар и др.), апатито-магнетитовых руд (Ковдор).

Объемы выхода пород вскрыши на железорудных ГОКах КМА (Михайловском, Стойлинском, Лебединском), на ОАО «Карельский окатыш», «Ковдорский ГОК» и «ОЛКОН» составляют 5 00 млн т/год при добыче железных руд и еще 100 млн т – сопутствующих нерудных [4]. Их использование до 10–30 % обеспечивается потребностями стройиндустрии в щебне, цементе, керамических и других материалах при максимальных объемах на ГОКах КМА в 21,4–41,3 млн м<sup>3</sup>.

Среднегодовое поступление отходов обогащения железорудного сырья в хвостохранилищах соответствующих ГОКов составляет 120–



140 млн т при выходе 35–80 %. В минеральном составе железистых кварцитов преобладает кварц (с полевыми шпатами, сульфидами и др. минералами), магнетитовых скарнов – карбонаты (с гранатом и др.), титаномagnetитовых – пироксен (диопсид – до 90 %), апатит-магнетитовых – форстерит (до 45 %) и карбонаты (до 40 %). Этим обусловлено их преимущественное использование как техногенного сырья (18–20 млн т/год) в производствах строительных и технических материалов. В частности, ОАО «ОЛКОН» на базе своих кварцитовых хвостов в свое время создал завод силикатного кирпича, а «Карельский окатыш» обладает пока нереализованным потенциалом использования Na-K-х фельзитов («геллефлинты») как высококачественного керамического сырья, хлоритово-талькового камня, обладающего уникальными теплофизическими и декоративными свойствами и т. д. Пока остаются неизученными и не оцененными сульфидные фракции хвостов этих ГОКов на рассеянные редкие и благородные металлы несмотря на обнаружение в них практически интересных концентраций золота.

Однако, «пионером» в изучении потенциальной и извлекаемой ценности своих поликомпонентных хвостов обогащения, а затем и вовлечения их в комплексное промышленное использование явился Ковдорский ГОК корпорации «Еврохим», последовательно организовавший детальное минералого-геохимическое изучение рудной залежи в карьере (Zr, Hf, U, Th и др.), получение из коренных карбонатитовых руд и реализацию 3-х товарных концентратов: магнетитового, апатитового и бадделеитового. С 1995 г. это предприятие приступило к эксплуатации лежалых хвостов мокрой магнитной сепарации, складированных в 1962–1980 гг. в качестве отходов от извлечения магнетита из высококомплексных бадделеит-apatит-магнетитовых руд. Разработка хвостов началась с учетом наших рекомендаций после завершения в начале 90-х годов минералого-геохимического картирования месторождения коренных карбонатитовых руд, выполнявшегося по договору с предприятием в целях оценки закономерностей распределения тонковкрапленного бадделеита, перспектив организации его попутного извлечения и потребительской ценности, включая уровни и природу повышенной радиоактивности исходного сырья [22]. Анализ литературных данных показал, что в 60-х годах содержания бадделеита в ковдорских рудах оценивались в 600 г/т, а в начале 90-х го-

дов, с углублением карьера более чем на 200 м, они уменьшились до 200–250 г/т. В то же время местные природоохранные органы планировали распределение экологически неизученных и опасных участков хвостохранилищ под садово-огородные участки. Эти обстоятельства преимущественно и явились обоснованием рекомендации на оценку хвостов Ковдора в качестве техногенного источника бадделеита и ассоциирующего с ним апатита.

Результаты выполненного нами детального картирования и минералого-геохимической паспортизации коренных ковдорских руд [22] послужили информационной основой разработок специалистами обогащательной лаборатории ИЦ Ковдорского ГОКа, Горного института КНИЦ РАН и ЗАО «Механобринжиниринг» технологии обогащения бадделеит- и апатитсодержащих хвостов с получением, соответственно, 2-х товарных концентратов.

С 2007 г. ОАО «Ковдорский ГОК» организовал новое производство по переработке текущих и лежалых хвостов обогащения ковдорского апатито-магнетитового сырья с попутным бадделеитом мощностью до 5 млн т/год, ориентированное на выпуск концентратов особо ценного бадделеита и апатита. Запасы лежалых «отходов» обогащения оценены в 68,2 млн т, включающих 18,414 млн т апатита, 170 тыс. т бадделеита и 887 тыс. т магнетита, а также полиминеральную нерудную часть запасов (форстерит, кальцит, доломит, диопсид, флогопит и др.). Среднее содержание в этих хвостах  $P_2O_5$  – 11,18 % и апатита 275 кг/т,  $ZrO_2$  – 0,25 % и бадделеита – 2,5 кг/т. Гравитационно-флотационная схема обогащения обеспечивает извлечение  $P_2O_5$  в апатитовый концентрат на 45–48 % из лежалых хвостов и 12,7 % – из текущих. При стоимости апатитового концентрата 3,2 тыс. руб. и бадделеитового 50,1 тыс. руб. /т и объемах их выпуска в период 2007–2012 гг., соответственно, 5,72 млн т и 26,6 тыс. т, суммарная валовая прибыль ГОКа за счет их реализации составила 5,87 млрд руб. [4].

Если ковдорский апатит отличается от редкоземельно-стронциевого хибинского низкими содержаниями редких металлов, то в бадделеите, помимо диоксида циркония, нами установлены высокие содержания гафния (15 кг/т), тантала (2,2 кг/т) и скандия (от средних – 250 до 400–600 г/т), а также тория. Эти особо ценные редкие металлы пока не извлекаются и даже не учитываются в стоимости импортируемой части

бадделеитовых концентратов. Тем самым, несмотря на успехи Ковдорского ГОКа в комплексной переработке природного и техногенного сырья на уровне производства и реализации 3-х минеральных концентратов – магнетитового, апатитового и бадделеитового (вместо одного), рекомендуемая нами задача переоценки и использования бадделеита в качестве источника Zr, Hf, Ta, Sc и Th пока остается нерешенной. Одновременно, с учетом результатов картирования месторождения, представляется целесообразным различать его потребительскую ценность по содержаниям тория, урана и их соотношениям: в северной части карьера обнаружены их минимальные содержания в составе бадделеита, в восточной – преимущественно ториевая природа радиоактивности и, наконец, для южной-центральной части карьера для бадделеита характерна наиболее высокая торий-урановая радиоактивность и сосредоточение его в пределах небольших изометричных обособлений специфической минеральной ассоциации в «матрице» рудных карбонатитов [22]. Тем самым обозначены принципиальные возможности селективной добычи руд с использованием бадделеита в качестве традиционного огнеупорного и редкометалло-керамического сырья, а также нового техногенного источника тория и широкого комплекса редких металлов.

В целом, пример организации Ковдорским ГОКом эксплуатации хвостов обогащения коренных руд одноименного месторождения иллюстрирует высокую эффективность этого нового, дополнительного производства как за счет выпуска фосфатной продукции, так и редкометалльной, особенностью которой является превышение стоимости относительно фосфатной почти в 17 раз. И это в период, когда закончилось производство бадделеита из карбонатитов Палаборо (ЮАР), благодаря чему ковдорский бадделеит оказался вне конкуренции на мировом редкометалльном рынке.

Не менее актуальными и продуктивными представляются перспективы организации извлечения благородных металлов из хвостов обогащения железорудного сырья КМА [23] и Костомукши [24, 25], скандия – из диопсидовых фракций хвостов Качканара и т. д.

Крупнейшие российские предприятия черной металлургии существенно опережают производителей цветных металлов как по объемам использования *шлаков* (преимущественно доменных) в строительстве дорог, гидротехнических сооруже-

ний, в качестве закладочных смесей в горном деле и производствах стройматериалов, так и в организации попутного извлечения особо ценных микрокомпонентов – германия, ванадия и др. рассеянных редких металлов, а в перспективе – золота и других благородных металлов (КМА, Костомукша и др.). Так, например, на Череповецком предприятии корпорации «Северсталь» налажены поставки потребителям всего объема *текущих доменных шлаков*, а Нижнетагильский и Новолипецкий металлургические предприятия предлагают потребителям попутную редкометалльную продукцию. В то же время черная металлургия России нуждается в таких легирующих добавках как Mn, Cr, Nb, V и **другие редкие металлы, повышающих качество металлопродукции и ее конкурентоспособность на мировых рынках**. При этом, если дефицит марганца и хрома возник из-за утраты их сырьевых источников с распадом СССР, то проблема организации выпуска феррониобия для труб большого диаметра и других стальных конструкций (сейсмоустойчивых зданий, мостов и др.) десятилетиями не решается из-за отсутствия необходимых государственных и частных инициатив и прямого инвестирования в проекты освоения разведанных руд. В качестве инновационного варианта решения этой проблемы следует обратить внимание поисковой геологии на задачу выявления и оценки источников природнолегированного железорудного сырья, подобного известному в Китае месторождению, где легирование ванадием было осуществлено, в частности, за счет переработки шлаков как отходов черной металлургии. Решение рассматриваемых задач повышения эффективности черной металлургии технологически может быть тесно связано с развитием производств прямого восстановления железа (ПВЖ), освоенного в СССР и осуществляемого на заводе в Старом Осколе в ограниченных объемах – 3,6 млн т/год, в то время как за рубежом этим способом в начале 2000-х годов производилось 56,0 млн т [25].

С этих позиций могут рассматриваться возможности и перспективы частичного самообеспечения черной металлургии добавками легирующих металлов. Об этом, в частности, свидетельствует производство ванадиевого чугуна и титанового шлака из титаномагнетитового сырья Гусевгорского месторождения на Урале, эксплуатируемого Качканарским горно-обогатительным и Нижнетагильским металлургическим предприятиями.

На Нижнетагильском металлургическом комбинате (НТМК) совместно с немецкими фирмами «Эрих Фридрих» и «КХД Гутбольт Ведаг» с 1996 г. организована переработка старогодних (с 1965 г.) шлаков в объеме 3,170 млн т/год. Общие запасы шлаков, содержащих восстановленный металл, оцениваются в 60 млн т и рассчитаны более чем на 20 лет эксплуатации с выпуском фракций металлопродукции с содержанием от 58 до 100 % железа. Использование этой продукции в производстве собственного агломерата стоимостью в 50–60 тыс. руб. /т обеспечивает значительный экономический эффект, т. к. его сторонние закупки обходятся в 200 тыс. руб. /т [19]. Техногенные ресурсы ванадия сосредоточены в шламовых отходах (20 тыс. т) ОАО «Чусовской завод», «Тулачермет», а также в нефтешламах мазутных ТЭС, зольных уносах угольных ТЭС и т. д. Примечательно, что даже железисто-ванадиевый концентрат Волковского месторождения, получаемый при обогащении Cu-Fe-V-х руд, сбрасывается в хвостохранилище из-за отсутствия потребителей, в то время как в Канаде и Венесуэле ванадий и никель извлекаются из нефти в процессе термкрекинга.

С использованием технологии ИМЕТ им. А. А. Байкова можно осуществлять *ликвационное* разделение плава титаново-железистой шихты в руднотермических печах с раздельным выпуском двух товарных продуктов [26]. Эта технология позволяет получать шлаки, обогащенные титаном до уровней искусственных титанитов и, таким образом, вовлекать в промышленное использование техногенное и природное титаномагнетитовое сырье, обедненное титаном (Хибины, Пудожгора в Карелии и др.), которое пока остается невостребованным.

В процессе *доменной* плавки сопутствующие компоненты рудной части шихты, флюсов и золы кокса также распределяются между чугуном и шлаками. Среднегодовой выход последних составляет 40–50 млн т. Как правило поликомпонентный мониторинг за составами различного по содержаниям сопутствующих компонентов железорудного сырья, направляемого в доменный процесс (например, оленегорского, ковдорского и костомукшского на Череповецком МК), так же как чугуна и шлаков, не осуществляется.

Исключением является работа специалистов МИСиС (Москва), которые в 1995–1996 гг. изучили распределение 78 ведущих и сопутствующих компонентов во всех видах ис-

ходного сырья, металлопродукции и отходов Череповецкого МК ОАО «Северсталь», т. е. составили *баланс их распределения в материальном потоке производства*. Суммарное количество особо ценных и токсичных компонентов-примесей в расчете на 1 т чугуна, выпускаемого Череповецким МК, составляет 4,27 кг (3,55 кг/т проката). С другой стороны, согласно оценкам МИСиС, каждая тонна выплавляемого чугуна сопровождается поступлением в окружающую среду и складываемые шламозолонакопители порядка 1,485 т сопутствующих микрокомпонентов [19].

*Сталеплавильные шлаки*, при среднегодовом выходе 20–22 млн т также могут содержать примеси полезных и лимитируемых (сера, фосфор) компонентов; последние эффективно удаляются из основных шлаков. Максимальная концентрация особо ценных «попутчиков» характерна для *шлаков ферросплавных* производств (до 5 млн /год). При их переработке извлекали до 28 тыс. т металлопродукции, в том числе – марганца (от содержаний 32 % в шлаке ферромарганцевого производства) как заменителя рудного сырья при получении силикомарганца.

*Газо-пылевые выбросы и шламы* черной металлургии связаны с агломерационным, доменным и сталеплавильным производствами. В шламах и пылях этих производств содержания железа составляют 45–70 % сравнительно с исходным сырьем, максимальные содержания характерны для сталелитейных; до 80 % агломерационных шламов возвращается в состав шихты агломерационных производств. Возврат 1 т железосодержащих шламов экономит расходы 400 т руды, 300 кг известняка-флюса, 100 кг угля и, тем самым, снижает затраты на выпуск чугуна [19]. Однако, повышенные содержания в колошниковых пылях домен и шламах цинка, свинца и щелочных металлов, лимитируемых с технологических позиций, обуславливают необходимость преимущественного сбрасывания их в шламонакопители. Складываемые шламы и содержания в них ценных «попутчиков» разубоживаются сбросами в шламонакопители других производственных отходов.

Кроме того, их повышенная влажность требует обезвоживания перед употреблением в производствах окатышей. Пылевые выбросы ферросплавных печей достигают 20 т в сутки (с каждой) при содержаниях 3–4 г/м<sup>3</sup>. Основным полезным компонентом многоцелевого использования является



аморфный кремнезем; из пылей и шламов извлекается широкий круг ценных компонентов.

В пылях агломерационного цеха ОАО «Карельский окатыш» в результате наших исследований обнаружены повышенные содержания As, Pb, Tl, Au и Ag, представляющие как промышленную ценность, так и экологическую опасность [24, 25]. Тем самым иллюстрируется необходимость поликомпонентного эколого-геохимического мониторинга на всех производствах черной металлургии, включая оценку их воздействия на окружающую среду и здоровье населения.

Согласно оценкам специалистов, техногенное загрязнение территории Череповецкого МК и его окрестностей обусловило поступление в рассеянном состоянии более 200 тыс. т сопутствующих цветных металлов, порядка 18 тыс. т мышьяка, до 3,5 тыс. т фтора [19]. Есть основания полагать, что подобная ситуация характерна для территорий других крупных предприятий – ветеранов черной металлургии – Магнитогорского, Новолипецкого, Нижнетагильского и др., что ориентирует на выполнение в их пределах комплексного изучения распределения макро- и микрокомпонентов в производственных «элементопотоках» и оценки масштабов техногенного загрязнения в целях интенсификации, коммерциализации и экологизации производственной деятельности этих предприятий.

### **Техногенные ресурсы угольных ТЭС**

Шлакозольные отходы (ШЗО) тепловых ТЭС на твердом топливе и их хранилища, широко распространенные на территории России и стран СНГ, до недавнего времени рассматривались преимущественно как источники экологического неблагополучия, обусловленного отчуждением земель и загрязнением среды обитания пылями и подотвальными водами, обогащенными токсичными микрокомпонентами. В шлакозолоотвалах нашей страны накоплено от 1,5 до 1,8 млрд. т ШЗО. Ежегодная их выработка 350 ТЭЦ, работающими на угле, оценивается в 30 млн т [27]. При этом 172 наиболее крупных ТЭЦ ежегодно вырабатывают по 100 тыс. т ШЗО. До 0,6 млн т отходов углесжигания, поставляемых потребителям, представлено наиболее ценной сухой золой уноса, а остальные из потребляемых объемов ШЗО (4 млн т) представлены гидратированными лежалыми смесями из обводненных хранилищ, которые используются в дорожном строитель-

стве (шлаки), при рекультивации нарушенных ландшафтов и в качестве добавок в производствах цемента (вместо глины). Таким образом, из 30 млн т ШЗО, вырабатываемых ежегодно, 24 млн т складываются в хвостохранилищах, содержание которых обременительно для ТЭЦ и представляет собой источник химического загрязнения среды обитания.

Между тем, в Германии и Дании достигнуто 100 %-е использование ШЗО, а в других зарубежных странах – 70–90 %-е. В нашей стране под шлакозолоотвалы отчуждено более 220 км<sup>2</sup> земель и накоплено порядка 2 млрд. т ШЗО. Ежегодные платежи ТЭС за размещение каждого 50 тыс. т ШЗО составляют 15–20 млн руб. (3–й класс опасности). Однако, фактически эти платежи должны быть значительно выше с учетом вторичного загрязнения среды обитания пылями и сточными водами с хранилищ ШЗО, а также за счет отнесения их к более высоким классам экологической опасности. Очевидно, что подвижные формы экологически лимитируемых катионных и анионных компонентов за счет миграции в «биоценозных цепочках» и накопления в живых организмах могут служить источниками эндемической микроэлементозной заболеваемости персонала и населения в районах угольных ТЭС [28].

В то же время рассматриваемые отходы углесжигания ТЭС представляют собой ценный и возобновляемый техногенный ресурс: в 1 т ШЗО может содержаться до 90 кг Fe, 160 кг Al, 10–30 кг Mg, 1–3 кг Ti и до 1 кг суммы редких металлов, которые могли бы быть использованы в черной и цветной металлургии. В Германии еще в 40-х годах прошлого столетия на Рюдесдорфском заводе из угольной золы производился глинозем, а в Англии из магнитной фракции золы – чугуны и сталь. Среди извлекаемых технологически, в том числе – в промышленных производствах особо ценных и радиоактивных металлов выделяются Ge, Ga, V, Cd, Au, хотя в перспективе их перечень значительно шире [29].

С этих позиций в ОИВТ РАН сформулирована принципиально новая идеология обращения с ШЗО, предусматривающая их глубокую и полную переработку с получением широкого ассортимента полезной продукции. Соответственно, в период 2008–2012 гг. в лаборатории экологических проблем энергетики ОИВТ при поддержке Президиума РАН и корпорации «ИнтерРАО ЕЭС» была разработана инновационная техно-

логия переработки высокоглиноземистой золы от сжигания экибастузского угля Троицкой ГРЭС (Южный Урал), которая последовательно, после термообработки исходного материала, позволяет получать следующие продукты: 1) магнитный железосодержащий концентрат (до 60 %  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), представленный микросферами многоцелевого, в том числе, прецизионного использования; 2) флотационный углеродный концентрат («недожог»), подлежащий возврату в котлы ТЭС и позволяющий сократить расход угля до 20 %; 3) глиноземный концентрат (39–46 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и 26–36 %  $\text{SiO}_2$ ), из которого получен товарный глинозем для выплавки алюминия; 4) белитовый шлам 2-х сортов – «цементный» и «керамический» [30].

Стадия выделения глинозема и снижения концентраций кремнезема предусматривает обработку пульпы хвостов флотации и тонких классов золы (<45 мкм) после электромагнитной сепарации раствором гидроксида натрия. В твердую фазу выделяется глинозем, а жидкая – представлена раствором силиката натрия. Регенерацией последнего известью достигается получение двухкальциевого силиката – белитового шлама и оборотного раствора гидроксида натрия, возвращаемого на химическое обогащение.

Среди традиционного топливно-энергетического сырья ТЭК наибольшая геохимическая изученность характерна для углей и шлакозольных отходов (ШЗО) углесжигания, а минимальная – для альтернативного ископаемого сырья, представленного природными битумами угольного и нефтяного рядов.

Согласно нашим техногеохимическим исследованиям ТЭЦ гг. Мурманска и Апатитов в Кольском регионе, а затем Черепетской и Каширской ГРЭС в ЦФО [31], геохимическая специфика углей определяется устойчивыми концентрациями Ti, Mn, P, Ba, Sr, Zr, B и PЗМ, а мазута Ni, V, Ti, Ba, Zn, Pb, Cu. Следовательно, для угольных аномалий в качестве индикатора загрязнения среды обитания может быть использован мультипликативный показатель  $\text{Ti} \cdot \text{Mn} \cdot \text{P} \cdot \text{Ba} \cdot \text{Sr}$ , а для «мазутных» –  $\text{Ni} \cdot \text{V} \cdot \text{Zn} \cdot \text{Pb} \cdot \text{Cu}$ , которые позволяют оконтурить и расшифровать соответствующие источники химического загрязнения на территориях и акваториях селитебно-промышленных зон как в пределах инфраструктурно-производственных, так и урбанизированных комплексов и площадей.

Сравнение средних содержаний микрокомпонентов в опробованных углях и ШЗО свидетельствует о том, что максимальная – шестикратная их концентрация в отходах углесжигания характерна для Ge и Ga среди редких металлов и Ni, Co, Pb, Zn, Sn – среди цветных, а также бария; меньшая, в 4–2,5 раза, характерна для Ti, Mn, V, P, Sr, Mo, Cu и минимальная, в 1,5 раза, для B, Zr, Nb, Sc, PЗМ [31].

Повышенные концентрации цветных, благородных и редких металлов в альтернативных видах энергохимического сырья – горючих сланцах и тяжелых высоковязких нефтях (ТВН), нередко превышающие их содержания в традиционном рудном сырье, могут извлекаться в процессе пиролиза и фракционирования исходного сырья. Согласно исследованиям специалистов РХТУ им. Д. И. Менделеева, с применением этих технологий возможно извлечение в остаточные продукты (кокс, полукокс, бертинаты и др.) не только широко распространенных и извлекаемых из ТВН в Канаде и США ванадия и никеля, но и наиболее ценного рассеянного рения. Для рения достигнуто извлечение 70 %.

К настоящему времени изучено распределение по блокам и фракциям технологической схемы ОИВТ особо ценных редких и цветных металлов с определением группы наиболее токсичных. Обнаружена концентрация галлия до 60–90 г/т, превышающая в 2–3 раза содержания в бокситах и нефелинах, служащих традиционным сырьем для его промышленного получения. Расчетами установлена возможность получения из 100 тыс. т золы 15 тыс. т глиноземного продукта стоимостью 135 млн руб. и попутно – 1,5 т галлия. При цене 500 долл. /кг стоимость попутного галлия составит 750 тыс. долл. или примерно 22,5 млн руб., т. е. порядка 20 % стоимости глинозема. Распределение остальных редких металлов в промпродуктах переработки экибастузской золы и эффективность их извлечения изучаются [31].

Как известно, в шлакозольных отходах (ШЗО) обнаружено порядка 150 минералов-концентраторов фазообразующих Fe, Ti, Mn, Mg, Ca, Al, щелочных металлов, а также особо ценных и токсичных микрокомпонентов. Поэтому изучение минеральных ассоциаций, их химического состава и структуры на всех стадиях физического и химического обогащения ШЗО является обязательным условием выбора способов переработки этих и других техногенных образова-

нии. В частности, отсутствие в пробах ШЗО кузнецкого угля, в отличие от экибастузского, на Каширской ГРЭС растворимых алюминийсодержащих фаз обусловило необходимость модифицирования разработанной технологии переработки золы в направлениях первоочередного выделения «недожога» и получения новых технических и строительных материалов.

**Распределение особо ценных и токсичных компонентов в материальном потоке горно-химического производства как информационно-методическая основа их дифференционной оценки**

Методика техногеохимической оценки распределения и выявления узлов и концентрации рассеянных особо ценных и лимитируемых микрокомпонентов в материальном потоке производства была впервые разработана и апробирована нами в 1976–1978 гг. на Ачинском глиноземном комбинате (ныне ОАО «АГК»). Это предприятие, в отличие от Волховско-Пикалевского, осуществляет гидрометаллургическую переработку необогащенного нефелинового сырья с получением глиноземного концентрата с попутными содопродуктами, хлоридом и сульфатом калия, портландцементом в объемах, в несколько раз превышающих переработку хибинских нефелиновых концентратов. Соответственно, масштабы поступления в технологический процесс элементов-примесей, согласно выполненным оценкам, несмотря на их меньшие содержания в исходном сырье сравнительно с хибинским, весьма значительны: несколько тысяч тонн редких (Ga, Sr, TR, Zr, Se, V и др.) и цветных (Cr, Ni, Co, Zn, Pb, Mo и др.) металлов и более десяти тыс. т фосфора и фтора. Изучение их распределения в технологических процессах, продуктах и отходах производства показало, что для профилирующих алюминатных растворов концентрация каких-либо микрокомпонентов не характерна, в то время как в остаточных растворах побочного содово-поташного производства, обогащенных K, Cl, S, CO<sub>2</sub>, обнаружены практически интересные концентрации Ga, Rb, Cs и Mo [32]. Содержания галлия (до 0,011–0,023 %) и рубидия (до 0,021–0,036 %) в маточниках поташа превосходят их содержания в нефелиновом и бокситовом сырье (от 5–10 до 40–60 крат), извлекаемые в промышленных масштабах. В соответствии с нашими рекомендациями по завершении договорных работ, на АГК была создана установка по извлечению галлия. Однако, в дальнейшем в

условиях «переходного периода», это инновационное производство, так же как и выпуск портландцемента, были закрыты руководством корпорации «РУСАЛ». В то же время было сооружено современное хранилище с геомембранным дном для складирования белитовых шламов – отходов глиноземного производства, использовавшихся в качестве техногенного сырья в побочном производстве портландцемента. Между тем, расчетами установлено, что за счет АГК при производительности глинозема на уровне 70–80-х годов выпуск галлия в масштабах страны мог быть увеличен в 2 раза, а рубидия – в десятки раз, что имело бы общегосударственное значение в настоящее время.

Как известно, руководство «РУСАЛ» в производстве глинозема и алюминия ориентируется на бокситовое сырье, вплоть до приобретения за рубежом соответствующих рудников и заводов из-за отсутствия в России богатых месторождений бокситов. Однако, нефелиновое сырье сравнительно с бокситовым обладает очевидными преимуществами в неограниченности и доступности запасов и ресурсов Хибин и Ловозера, повышенной извлекаемой ценности за счет широкого ассортимента сопутствующей глинозему стеклокерамической и высоколиквидной химической продукции, включая поташ и редкие металлы, выпуск портландцемента для стройиндустрии и, в конечном счете, полного и многоцелевого использования побочных продуктов глубокой переработки нефелинового сырья.

В новой России в очередной раз сложилась ситуация недооценки промышленной значимости нефелинового сырья, которая, в частности, проявилась в ликвидации несколько десятков сопутствующих химических производств, связанных с переработкой Волховско-Пикалевским объединением нефелина на глинозем, а также в прекращении на ОАО «АГК» выпуска галлия и портландцемента. Эта ситуация, в известной степени, повторяет многолетнее ведомственное сопротивление Минцветмета, развитию производств глинозема на базе хибинского нефелинового сырья в СССР, рекомендованного научными специалистами РАН и поддержанного Минхимпромом. Ситуация в советское время изменилась после принятия решения на правительственном уровне и реализации строительства крупнейшего в стране градообразующего АГК, использующего необогащенное нефелиновое сырье. В свое время СССР был единственным в мире экспор-



тером наиболее ценного содопродукта – поташа, получаемого при переработке нефелина, а доля попутного извлекаемого галлия в общероссийском производстве достигла в 90-е годы 50 % и сравнялась с его производством из бокситов. При этом себестоимость получения галлия из нефелинового сырья, согласно расчетам ВИМИ и ИХТРЭМС, была на 30 % ниже оптовых цен, а рубидия – в 10–11 раз. Нефелин, благодаря технологии извлечения рубидия (с цезием), разработанной в ИХТРЭМС КНЦ РАН, оказался новым сырьевым источником этих редких щелочных металлов при себестоимости их производства в 5–7 раз ниже сравнительно с технологией использования в этих целях традиционного карналитового сырья довоенной Германией и СССР.

С экологических позиций глубокая и комплексная переработка нефелинового сырья на глинозем с сопутствующими продуктами должна включать пыли спекания нефелина с известняком и пыли цементных печей, объемами которых, в свое время, «прославился» АГК. Однако, впервые полученные нами данные об их поликомпонентном составе свидетельствуют о повышенных, в пределах ПДК, содержаниях в пылевых выбросах F, Sr, Pb, Cr, Se и некоторых других элементов, которые находятся в химически связанном состоянии с преобладающими кремнием и кальцием. Обнаружено обогащение пылей АГК рубидием (до 0,017–0,048 %) и цезием (до 0,003 %), т. е. в 6–15 и, соответственно, в 24 раза относительно содержаний в исходном сырье [32].

Отходы переработки бокситов, представленные красными шламами, пока не используются промышленностью, хотя содержащееся в них железо может представлять интерес для черной металлургии, а скандий и, возможно, другие ассоциирующие с ним редкие металлы (Zr, TR, V) – для цветной металлургии и редкометальной промышленности. Возрастающие масштабы накопления поликомпонентных красных шламов представляют определенную угрозу для среды обитания за счет миграции лимитируемых компонентов в составе пылей и сточных вод. С красными шламами связаны потери глинозема (до 15 %), железа, щелочных металлов и указанных редких металлов, а также урана (50–60 г/т) и тория (20–30 г/т), которые обладают повышенной миграционной способностью и представляют определенную опасность при накоплении в среде обитания. Наряду с традиционными обогащательными методами выделения ряда промпро-

дуктов – железистого (до 50 % Fe) и алюмокарбонатного (с 14–16 % глинозема и 30 % карбоната кальция), разработаны нетрадиционные гидро- и пирохимические технологии переработки красных шламов, позволяющие извлекать скандий и другие металлы. При невысоком содержании железа красные шламы могут использоваться в производстве цемента, а при высоком – агломерата (окатышей) для доменного производства, но в обоих случаях – с потерями ценных микрокомпонентов. Таким образом, отходы обогащения бокситов, в отличие от нефелинового сырья, пока являются потенциально ценными, но экологически небезопасными техногенными ресурсами, требующими комплексной переработки и использования.

### **Инновационный потенциал техногенных ресурсов: зарубежные реалии и российские перспективы**

В мировой практике переработки отходов ГПК, ХМК и ТЭК, получившей широкое развитие с 60-х годов прошлого столетия, используются все ресурсные, техноэкологические и экономические возможности производства металлопродукции и нерудных материалов для стройиндустрии, металлургии и энергетики. Переработка и использование горнопромышленного техногенного сырья за рубежом достигли 85–90 % (США, Зап. Европа). Этому способствовали дефицит и высокая стоимость земель, санкции за загрязнение среды, система контроля за использованием земель и недр, в том числе – из космоса, а также поощрительные платежи. С этих позиций оценка потребностей промышленно-развитых стран в природном сырье стала проводиться за вычетом объемов возможного производства необходимой продукции из техногенных источников. Промышленное использование «отходов», которые в Европе с 60–65-х годов оцениваются и используются как ценное сырье, возрастает каждые 10 лет на 10–30 %. Тем не менее, их количество в расчете на душу населения ежегодно увеличивается на 4–6 %, что превышает скорость роста населения в 3 раза.

Данные табл. наглядно иллюстрируют преимущества зарубежных производств широкого круга цветных, рассеянных, редких и благородных металлов из различных медно-сульфидных руд сравнительно с получением исключительно профильных медных и цинковых продуктов, иногда сопровождаемых извлечением золота и серебра, на предприятиях Урала.

Таблица. Извлекаемые из медно-сульфидных руд песчаников и сланцев и перспективные для извлечения ассоциации цветных, рассеянных редких и благородных металлов

Месторождения	Рудные компоненты			
	извлекаемые	перспективные для извлечения	установленные, но не извлекаются	могут быть установлены
Мансфельдское Германия	<u>Cu</u> , <u>Pb</u> , <u>Zn</u> , Mo, <u>Co</u> , <u>Ni</u> , V, <u>Se</u> , Ag, Au, Pt, Pd, <b>Re</b>	<u>Cd</u>	<u>U</u> , Rh, <b>Os</b> , Ga, Ge	<u>Zn</u> , Te, <u>Bi</u>
Предсудетское Польша	<u>Cu</u> , <u>Pb</u> , <u>Zn</u> , Mo, <u>Co</u> , <u>Ni</u> , V, <u>Se</u> , <u>Cd</u> , Ag, Au, Pt, Pd, <b>Re</b> , Ga		<u>Bi</u> , <u>U</u> , <u>Te</u> , Rh, <b>Os</b> , <u>In</u> , Ga	
Замбийское Замбия	<u>Cu</u> , <u>Zn</u> , <u>Co</u> , <u>Ni</u> , V, <u>Bi</u> , Ag, Au, Pt, Pd	<b>Re</b> , Cd, U, Pb	Mo, Ge	Ga, <u>In</u> , <b>Os</b> , Rh, <u>Te</u> , <u>Se</u>
Жезказганское Казахстан	<u>Cu</u> , <u>Pb</u> , <u>Zn</u> , Ag, <b>Os</b> , <b>Re</b>	Mo, <u>Co</u> , <u>Cd</u> , Au	<u>Zn</u> , Pd, Pt, <u>Bi</u> , Ni	V, <u>U</u> , <u>Se</u> , <u>Te</u> , Rh, Ga, Ge

Примечание: подчеркиванием выделены токсичные элементы, жирным шрифтом – рений и осмий.

Обращает на себя внимание разнообразие форм организации и переработки техногенного сырья за рубежом. Отходы обогащения и металлургических переделов служат объектами эксплуатации как крупными предприятиями, так и мобильными мини-заводами, которым в последнее время отдается предпочтение. Так, например, в ЮАР перерабатываются 18 млн т отвальных хвостов золотодобычи в год (50 тыс. т/сутки) при содержаниях золота 0,53 г/т, урана 40 г/т и серы 1,04 %). Подобный же комплекс, созданный в Испании, перерабатывает ежегодно 2 млн т хвостов с извлечением золота, серебра и выпуском удобрений, сырья для домен и т. д. В других странах созданы 110 установок кучного выщелачивания золота из отвалов и бедных руд производительностью от 0,1 до 3,5 млн т горной массы в год. США этим способом увеличили в течение 10 лет (1980–1990 г. г.) производство золота в 10 раз. Подобным же образом, т. е. отвальным, кучным и подземным выщелачиванием с использованием модифицированных сернокислотных методов, производится извлечение меди, цинка, свинца, серебра, урана и ряда других полезных компонентов из отработанного или бедного сульфидного сырья и рудничных вод. С применением этих способов США за последние 10 лет увеличили производство меди в 8 раз, которое достигло 0,5 млн т/год при суммарных затратах на 1 фунт меди 0,2–0,4 долл. Ряд европейских компаний осуществляет получение металлопродукции из привозного техногенного сырья: например, Германия – из пиритных огарков Финляндии (**Cu**, **Zn**, **Pb**, **Fe**), Франция – из штейнов Новой Каледонии, Англия – из канадского никелевого сырья (Cu, Co) и т. д. В США, Китае и некоторых европейских странах доказана рентабельность доизвлечения угля из отходов его обогащения. Так, во Франции с 1973 г. стали обрабатывать отвалы Северного угольного бассейна,

накопленные за 250 лет: за короткий срок здесь было получено 5,5 млн т товарного угля. Китай использует отходы угледобычи на малых теплоэнергетических установках и т. д. [19, 33].

В 70-е годы за счет вторичной пирометаллургической переработки отвальных шлаков оловоплавильных заводов Таиланда, Малайзии, Индонезии и других стран, накопленных за 100 лет, производство тантала составило 60 % его мирового выпуска. В Китае переработка шлаков с заводов черной металлургии сопровождается выпуском ванадиевой продукции, а в США, Англии, Японии, ЮАР и др. странах – Cu, Zn, Au, Ag, Pb, Sn, As, Hg, Bi, Cr, Ni.

Примечательно, что применение в мировой практике для переработки техногенного сырья модульных мини-заводов, перемещаемых с объекта на объект по мере выполнения своих задач, позволяет использовать готовую инфраструктуру горнопромышленных районов, где производится или производилась отработка коренных руд или россыпей.

Россия, в отличие от зарубежных стран, обладает значительным многообразием и масштабами накопления техногенных ресурсов, что обусловлено экстенсивным характером недропользования, унаследованным от СССР. Потенциал отечественных инновационных разработок, готовых к апробации в производственных условиях в целях глубокой переработки многих видов техногенных ресурсов, вполне достаточен, но остается невостребованным со стороны горнопромышленного бизнеса и государства в течение 25 лет «переходного периода». Эксплуатация советского индустриального наследия не только обусловила ситуацию «невостребованности» инновационного технологического потенциала страны, но и потери необходимых ориентиров развития и, главное, кадров, способных его осуществлять [34].

В то же время в российской минерально-сырьевой базе цветных металлов сложилась ситуация отсутствия прироста запасов никеля и олова относительно их извлечения из недр, а для цинка, меди и других этот прирост не превышает 28 %. Очевидна перспектива восполнения возникшего дефицита в балансе потребления и пополнения запасов цветных металлов и золота за счет вовлечения в переработку текущих и лежащих техногенных ресурсов, потенциал которых превышает масштабы добычи цинка и меди или способен снизить остроту проблемы для никеля и олова. Для нерудных отходов возможности использования стройиндустрии к 2020–2030 гг. оцениваются в 400–500 млн т/год, а с учетом потребностей закладочных и рекультивационных работ в 1 млрд. т/год, что составляет 40–50 % их прогнозируемого годового выхода [4].

Главный эколого-экономический эффект от вовлечения техногенных ресурсов в комплексное промышленное использование заключается в их инновационно-техноэкологическом потенциале. Примеры отечественных техноэкологических инноваций, остающихся пока невос требованными, создают основу регулирования техногенных нагрузок на среду обитания с использованием принципа *наилучших доступных технологий* производственных процессов, установок и режимов их эксплуатации. Эта новая стратегия, используемая как базовая в экологизации производств, получила известность и признание в Европе как Best Available Technology (Bat). В отличие от традиционно репрессивных способов регулирования экологической деятельности предприятий, оцениваемой в нашей стране «на конце трубы» с применением весьма условных ПДК, ПДВ и ПДС, современная экологическая идеология предусматривает *предупреждение* экологических нарушений, а не нейтрализацию их последствий. Таким образом, эта идеология становится инструментом *инновационного развития*, которое по своей сути представляет собой непрерывный процесс самоорганизации и качественного совершенствования [35].

Очевидные перспективы широкого внедрения рассматриваемых инновационно-технологических методов комплексной гидро- и пирометаллургической переработки различных техногенных ресурсов и бедных руд, не поддающихся обогащению традиционными методами, а также их комбинирования друг с другом в сложных технологических схемах свидетельствуют в поль-

зу развития *инновационно-техноэкологического предпринимательства* как важного элемента государственной научно-технической политики в регионах и России в целом. Очевидно, что перспектива вовлечения в промышленное использование техногенных ресурсов страны представляет собой альтернативу экстенсивному недропользованию, унаследованному от бывшего СССР. При этом следует иметь в виду, что ежегодный оборот мирового рынка наукоемких технологий составляет 3 трлн. долл., что в несколько раз превышает оборот на рынках сырья, включая нефть. В передовых промышленно-развитых зарубежных странах, в отличие от России, до 80 % ВВП представлено конечной высокотехнологичной продукцией, в том числе – получаемой за счет глубокой переработки как природного, так и техногенного сырья. При этом более 50 % наукоемкой продукции в США создается малыми предприятиями, что в пересчете на 1 работника в 2,5 раза больше, чем на крупных предприятиях. Поэтому создание в нашей стране инфраструктуры малого-среднего инновационно-технологического предпринимательства, кооперированного с крупным бизнесом или самостоятельного, представляет собой исключительно актуальную задачу, требующую целевого объединения усилий и средств всех уровней государственной власти, крупных ФПП, предпринимателей и представителей академической, отраслевой и вузовской науки [1, 2, 36].

Ускоренное промышленное освоение техногенных ресурсов с использованием вышеизложенной методологии возможно при условии проявления государственной политической воли, корпоративного взаимодействия науки, бизнеса и власти, и реализации государственно-частного партнерства. Для этого необходимо совершенствование российского законодательства в целях обеспечения инвестиционной привлекательности техногенных ресурсов в следующих основных направлениях:

1. Дать правовое определение терминам «техногенные ресурсы», «техногенное сырье» и «техногенное месторождение» и утвердить *права собственности* на них в отношении хозяйствующих субъектов и инвесторов – претендентов на рациональное использование отходов производства;
2. Ограничить возможности лицензирования прав на недропользование в отношении месторождений природного сырья при наличии в регионе подобных ему техногенных ресурсов;



3. Утвердить *опережающую* роль соответствующих НИР и НИОКР научных организаций и специалистов при подготовке проектов комплексной оценки и вовлечения в промышленное использование техногенных ресурсов и сырья;

4. Определить платежи за право пользования отходами сопряженных производств ГПК, ХМК, ТЭК и установить льготы при их эффективном (с экономических, экологических и социальных позиций) использовании;

5. Закрепить как международную норму в обращении с отходами приоритет их переработки над складированием, рекультивацией и захоронением.

В последние годы в нашей стране прослеживалась тенденция противопоставления базовому минерально-сырьевому сектору экономики высокотехнологичных направлений ее развития. Авторы этой парадигмы, по-видимому, не представляют себе масштабы и значимость обеспечения исходным сырьем, которым традиционно богата наша страна, как перерабатывающего сектора экономики, так и его высокотехнологичных отраслей, на создание и развитие которых нам потребуется не одно десятилетие. Об этом, в частности, свидетельствует фактическая ликвидация развитых в советское время редкоземельных и редкометальных производств при наличии собственной минерально-сырьевой базы редких металлов. Поэтому своевременными и уместными должны быть призывы, рекомендации и, главное, конкретные действия по интенсификации деятельности ГПК, ХМК и ТЭК за счет создания условий для их инновационного развития. При этом освоение техногенных ресурсов может и должно сыграть роль «спускового механизма» в технической модернизации всего сырьевого сектора, который остается в нашей стране *базисным* относительно всех остальных.

К сожалению, в новой России отсутствует надведомственный *Координационный центр* по определению текущих и будущих, в перспективе на ближайшие 20–30 лет, потребностей нашей промышленности в видах сырья, определяющих ее инновационное развитие. Ведущие научные специалисты – геологи, технологи, экономисты, экологи, которые способны в силу своей квалификации и приобретенного опыта прогнозировать эти потребности и способы их удовлетворения, пока остаются невостребованными. Как правило, они сосредоточены в институтах РАН, будущее которых становится неопределенным. В этой ситуации представляется целесообразным и необходимым проявление инициативы в реализации вышеизложенных научно-производственных идей не только со стороны науки, но и от предприятий ГПК, ХМК, ТЭК, владельцы которых должны быть в первую очередь заинтересованы в интенсификации производств. Исключительно актуальным представляется организация *корпоративного взаимодействия академической, вузовской и отраслевой науки*, включающей, прежде всего, ИТР самих предприятий. Наконец, должен быть реализован ожидаемый синергетический эффект от взаимодействия триады «наука – бизнес – власть».

В заключение следует привести призыв А. Е. Ферсмана, автора концепции техногенеза, к формированию инновационного *креативного* мышления и образа действий у нового поколения профессионалов-сырьевиков: «Я призываю к новым формам нашего горного хозяйства, в котором геолог должен быть химиком, геохимик – технологом, технолог – экономистом, а хозяйственник, опираясь на всех вместе, тем общественником, который ставит новое хозяйство на основе комбинирования».

## ЛИТЕРАТУРА

1. Техногенные ресурсы и инновации в техноэкологии. Под ред. Е. М. Шелкова, Г. Б. Мелентьева. – М: ОИВТ РАН, 2008. – с. 352.

2. Мелентьев Г. Б. Инновационный потенциал и оценка техногенных ресурсов. В сб. Материалы Конгресса «Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований» (Техноген – 2014), г. Екатеринбург, Научн. Совет по металлургии и металловедению ОХМН РАН, 2–6 июня 2014 г. – Екатеринбург: Ин-т металлургии, 2014. С. 4–18.

3. Мелентьев Г. Б. Научно-методические аспекты комплексной ресурсно-экологической оценки поликомпонентных отходов ГПК, ХМК и ТЭК и перспективы их вовлечения в промышленное использование с получением высоколиквидной продукции. В сб. *V Всеросс. научной конф. с международн. участием* «Проблемы рационального использования природного и техногенного сырья Баренц-региона в технологии строительных и технических материалов», 12–15 ноября 2013 г., Апатиты, КНЦ РАН. – Апатиты, ИХТРЭМС КНЦ РАН, 2013. С. 25–27.

4. Михайлов Б. К., Киперман Ю. А., Комаров М. А. и др. Техногенные минеральные ресурсы. – М: Научный мир, 2012. – с. 236.
5. Леонтьев Л. И., Пономарев В. И., Шешуков О. Ю., Романова О. А. Исследования ИМЕТ УрО РАН в области переработки и утилизации техногенных образований. В сб. Труды Конгресса с международным участием и элементами школы молодых ученых «Фундаментальные исследования и прикладные разработки процесса переработки и утилизации техногенных образований». – Екатеринбург: УрО РАН, 2014. С. 36–40.
6. Мелентьев Г. Б. Технологическая геохимия – актуальное информационно-аналитическое направление в геоэкологии. В сб. Доклады VI Международн. научн. конф. «Геоэкологические проблемы современности», 8 октября 2014 г., Владимирский Госуниверситет им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир, 2014. С. 22–27.
7. Мелентьев Г. Б., Калиш Е. А., Карамнов А. И., Павлов Р. И., Ремез В. К., Аргамаков И. Г. Перспективы и опыт комплексного использования сырья редкометалльных полевошпатowych и нефелин-полевошпатowych месторождений СССР. В ж. Редкие элементы. Сырьё и экономика, вып. 13. – М: ИМГРЭ, 1977. С. 3–11.
8. Макаров В. Н., Крашенинников О. Н., Гуревич Б. И. и др. В кн. Строительные материалы из минерального сырья Кольского полуострова. Ч. 2 – Апатиты: КНЦ РАН. С. 77–88.
9. Суворова О. В., Кожина И. С. Стеклокристаллические материалы из горнопромышленных отходов для декоративной отделки. Теоретические предпосылки использования вскрышных пород и отходов обогащения потенциальных рудоносных районов Республики Карелия для создания строительных и технических материалов. В сб. докладов IV Международн. конф. «Проблемы рационального использования природного и техногенного сырья Баренцева региона в технологии строительных и технических материалов», 6–10 июня 2010 г., г. Архангельск, Архангельский ГТУ. – Архангельск, 2010.
10. Пак А. А., Крашенинников О. Н., Сухорукова Р. Н. Эффективная изоляция тепловых сетей ячеистобетонными изделиями на основе золоотходов. В сб. Техногенные ресурсы и инновации в техноэкологии. Под ред. Е. М. Шелкова, Г. Б. Мелентьева. – М: ОИВТ РАН, 2008. С. 70–75.
11. Федоров С. Г., Николаев А. И., Брыляков Ю. Е., Герасимова Л. Г., Васильева Н. Я. Химическая переработка минеральных концентратов Кольского полуострова. – Апатиты, 2003. – с. 198.
12. Мелентьев Г. Б., Самонов А. Е., Делицын Л. М., Ваньшин Ю. В., Зубков А. А. Современное состояние и перспективы утилизации, обезвреживания, комплексной переработки и использования фосфогипса. В сб. Материалы III Международной научной конференции «Проблемы рационального использования природного и техногенного сырья Баренцева региона в технологии строительных и технических материалов», 25–27 сентября 2007 г., Сыктывкар: Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, с. 117–120.
13. Самонов А. Е. Новые данные по минеральным формам редких металлов в фосфогипсовых отходах. ДАН, т. 440, № 2, 2011. С. 234–237.
14. Абрамов А. М., Соболев Ю. Б., Галиева Ж. Н. и др. Исследование по разделению РЗК различного состава и происхождения с получением индивидуальных РЗЭ. Создание автоматизированной установки по разделению на базе каскада центробежных экстракторов. В сб. Материалы научн.-практич. конф. «Актуальные вопросы получения и применения РЗМ», Москва, 21 октября 2014 г. – М: ОАО «Гинцветмет», 2014. С. 134–137.
15. Мелентьев Г. Б. Фазовая несмесимость в расплавах как инновационный техноэкологический фактор экспрессной переработки природного и техногенного сырья. В сб. Материалы Всеросс. научн. конф. с международн. участием «Исследования и разработки в области химии и технологии функциональных материалов», 27–30 ноября 2010 г., ИХТРЭМС КНЦ РАН, Апатиты. – Апатиты, КНЦ РАН, 2010. С. 127–129.
16. Касиков А. Г., Арешина Н. С., Касикова Н. И. Извлечение редких элементов из отходов сернокислотного производства ОАО «ГМК Североникель». В сб. Техногенные ресурсы и инновации в техноэкологии. Под ред. Е. М. Шелкова, Г. Б. Мелентьева. – М: ОИВТ РАН, 2008. С. 97–103.
17. Мелентьев Г. Б., Трошкина И. Д., Зубков А. А. Ресурсно-экологические проблемы создания производств в России и перспективы их решения. В ж. Экология промышленного производства, вып. 4. – М: ФГУП ВИМИ, 2011. С. 2–15.
18. Мелентьев Г. Б., Овчарова Е. С., Малинина Е. Н., Заболоцкий А. И. Ресурсно-технологические проблемы комплексного использования природного и техногенного медно-сульфидного сырья с получением попутной высоколиквидной продукции. В сб. Техногенные ресурсы и инновации в техноэкологии. Под ред. Е. М. Шелкова, Г. Б. Мелентьева. – М: ОИВТ РАН, 2008. С. 133–148.
19. Шуленина З. М., Анфилатова Н. В., Ковалева Е. Н. и др. Техногенные ресурсы России. Справочник. – М: ЗАО «Геоинформмарк», 2001. – с. 202.
20. Заболоцкий А. И. Практика и перспектива извлечения металлов из отходов сернокислотных производств – пиритных огарков. В сб. Материалы Всеросс. конф. «Проблемы рационального использования отходов горнодобывающих производств», 25–26 апреля 2013 г., Москва. – М: СФ РФ – maxconference, 2013.
21. Мелентьев Г. Б. Пирит – на вес золота. В ж. «Редкие Земли», № 2, 2014. С. 106–107.
22. Мелентьев Г. Б. Научно-методические основы и результаты комплексной оценки месторождений природного и техногенного сырья. В сб. «Зна-

чение исследований технологической минералогии в решении задач комплексного освоения минерального сырья». Материалы 2-го Всеросс. семинара по технологич. минералогии, 14–16 июня 2007 г., г. Петрозаводск. П.: Институт геологии КарНЦ РАН, 2007. С. 35–58.

23. Чернышов Н. М., Попкова Н. В. Золото-платиноносная рудовмещающая система стратиформного типа в докембрийских образованиях Михайловского рудного узла КМА. Вестник Воронежского ун-та. Серия геологическая, 2006, № 2. С. 159–166.

24. Мелентьев Г. Б. Распределение золота и других особо ценных и токсичных микрокомпонентов в железорудном сырье Костомукши и продуктах его переработки. В материалах V Конгресса обогатителей стран СНГ. 23–25 марта, 2005 г., Москва. Том 1. М.: МИСИС, 2005. С. 35–39.

25. Мелентьев Г. Б., Шелков Е. М., Делицын Л. М. Возможности и перспективы повышения эффективности железорудно-металлургических производств за счет прямых переделов и комплексного использования сырья. VI Конгресс обогатителей стран СНГ, 28–30 марта 2007 г., Москва. – М.: МИСИС. I том. С. 77–83.

26. Резниченко В. А., Шабалин Л. И. Титаномагнетиты. Месторождения, металлургия, химическая технология. – М.: Наука, 1986. – с. 293.

27. Калачев А. И. Комплексная система утилизации ЗШМ. Буклет консорциума «Феникс». Октябрь 2014 г. – с. 19.

28. Мелентьев Г. Б., Малинина Е. Н., Делицын Л. М., Короткий В. М. Геохимическая оценка экологической безопасности ТЭС и перспективы извлечения особо ценных и токсичных компонентов из отходов углесжигания. В сб. V Всеросс. научной конф. с междунаrodn. участием «Проблемы рационального использования природного и техногенного сырья Баренц-региона в технологии строительных и технических материалов», 12–15 ноября 2013 г., Апатиты, КНЦ РАН. – Апатиты, ИХТРЭМС КНЦ РАН, 2013. С. 52–54.

29. Мелентьев Г. Б., Малинина Е. Н. Угольное сырье и отходы его переработки как источник промыш-

ленно ценных и токсичных элементов-примесей: состояние изученности и перспективы комплексного использования в интенсификации и экологизации углепотребления. В ж. Экология промышленного производства. – М.: ФГУП ВИМИ, вып. 2, 2008. С. 51–65; вып. 3, 2008. С. 41–53.

30. Делицын Л. М., Власов А. С., Рябов Ю. В. Инновационная технология глубокой и полной переработки зольных отходов угольных ТЭС как альтернатива традиционному накоплению и складированию. В сб. «Комплексное освоение и переработка техногенных образований с использованием инновационных технологий». – Челябинск, ЮУр ГУ, ЧДУ, ОИВТ РАН, 2013. С. 103–108.

31. Мелентьев Г. Б., Малинина Е. Н., Самаев С. Б., Букарь В. П. Геохимическая индикация потенциальной ценности и экологичности поликомпонентного угольного и мазутного топлива тепловых электростанций (ТЭС). В ж. Экология промышленного производства, вып. 1, 2014. С. 60–70.

32. Методы изучения рассеянных металлов в глиноземном сырье и возможности их попутного получения. Под редакцией В. В. Иванова и Г. Б. Мелентьева. – М.: ИМГРЭ, 1988. – с. 163.

33. Мелентьев Г. Б. Создание индустрии переработки возобновляемых техногенных ресурсов и инновационная техноэкология как альтернатива экстенсивному недропользованию. В сб. Север и рынок. – Апатиты: КНЦ РАН, 2007. С. 178–184.

34. Мелентьев Г. Б. Техногенный потенциал: в ожидании промышленного освоения. В ж. «Редкие Земли», № 3, 2014. С. 132–141.

35. Шкиперова Г. Т., Мелентьев Г. Б. Экологизация производств как составляющая процесса технической модернизации. В ж. Экология промышленного производства, вып. 4. – М.: ФГУП ВИМИ, 2010. С. 15–24.

36. Мелентьев Г. Б. Инновационная техноэкология и новые задачи технологической минералогии. В межотраслевом научн. -практ. ж. Экология промышленного производства. Вып. 2, 2009. С. 40–51. Вып. 3, 2009. С. 13–29.

## ОЦЕНКА МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОГО ПОТЕНЦИАЛА ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ

*Зарецкий М. В.<sup>1</sup>, Горбатова Е. А.<sup>1</sup>, Ожогова Е. Г.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Г. И. Носова», <sup>2</sup> ФГУП «ВИМС», г. Москва

Глубокая переработка и/или рекультивация отходов горно-металлургического профиля позволит снизить экологическую нагрузку в горнопромышленных регионах Российской Федерации и расширить минерально-сырьевую базу предприятий с получением черных, цвет-

ных, редких, и других металлов, а также создать композиционные строительные материалы различного назначения.

Выбор и обоснование технологии глубокой переработки может быть произведен путем минералого-технологической оценки отходов,



позволяющей получить полную и достоверную информацию об основных параметрах, характеризующих их качественные показатели, а также анализ объемов отходов с последующей систематизацией данных в виде кадастра отходов производства.

Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 30 сентября 2011 г. № 792 г. Москва «Об утверждении Порядка ведения государственного кадастра отходов» устанавливает порядок ведения государственного кадастра отходов, включающий процедуры сбора, обработки, систематизации и представления информации о видах отходов, их происхождении, химическом и (или) компонентном составе, агрегатном состоянии и физической форме, классе опасности, условиях и конкретных объектах размещения отходов, технологиях использования и обезвреживания отходов различных видов.

Государственный кадастр отходов состоит из федерального классификационного каталога отходов (ФККО), государственного реестра объектов размещения отходов, банка данных об отходах и о технологиях использования и обезвреживания отходов различных видов и ведется по единой для Российской Федерации системе.

Федеральный классификационный каталог отходов – перечень видов отходов, находящихся в обращении в Российской Федерации и систематизированных по совокупности классификационных признаков: происхождению, условиям образования (принадлежности к определенному производству, технологии), химическому и (или) компонентному составу, агрегатному состоянию и физической форме.

Государственный реестр объектов размещения отходов представляет собой свод систематизированных сведений об эксплуатируемых объектах хранения отходов и объектах захоронения отходов, соответствующих требованиям, установленным законодательством Российской Федерации.

Банк данных об отходах и о технологиях использования и обезвреживания отходов различных видов содержит детальные сведения о видах отходов, включенных в ФККО, и их характеристиках, а также сведения о технологиях, применяемых для использования и обезвреживания отходов.

Существующий государственный кадастр отходов дает неполное представление о

природно-технологических свойствах отходов горно-металлургического профиля и не дает прогнозной оценки их переработки. Разработка технологий переработки таких отходов базируется на полной информации об исходной сырьевой базе предприятия, о технологических показателях предприятий добывающих и перерабатывающих минеральное сырье и минералогической оценке отходов [1].

На примере отходов обогащения колчеданных руд была создана программа базы данных [2], включающая в себя, пять основных пошаговых операций (рис. 1). Первые три – это формирование основных информационных массивов взаимосвязанных друг с другом. Первый массив предусматривает характеристику сырьевой базы предприятия, второй – горно-обогательного предприятия, третий – отходов обогащения. Четвертый и пятый шаг – оперативная оценка целесообразности и эффективности технологии переработки или утилизации текущих хвостов обогащения, основанная на минералогических критериях.

Первый информационный массив «Сырьевая база» включает:

1. Полное наименование объекта исследования.
2. Полезное ископаемое: горючие; нерудные; руды; камнецветное сырье и драгоценные камни; гидроминеральные; горно-химическое сырье.
3. Руда: железные; медные; медно-цинковые; никелевые и кобальтовые; алюминийсодержащие; драгоценные и редкие; свинцово-цинковые; оловянные; титаномagnetитовые; вольфраммолибденовые; сурьмяно-ртутные.
4. Промышленный тип месторождений (медных руд): медно-никелевый; медистых песчаников и сланцев; медно-колчеданный; меднопорфировый; скарновый; кварцево-сульфидный.
5. Структурно-формационный тип месторождений (медно-колчеданный тип): кипрский, домбаровский (медно-колчеданный, иногда обогащен кобальтом); бесси, уральский (медно-цинковый); куроко, баймакский (золото-барит-полиметаллический); атлантический, ивановско-ишкининский (кобальт-медноколчеданный).
6. Промышленный сорт руды (медноколчеданный тип): медный колчедан; медно-цинковый колчедан; вкрапленный медный; вкрапленный медно-цинковый.

Пример оформления массива сырьевой базы данных приведен на рис. 2.

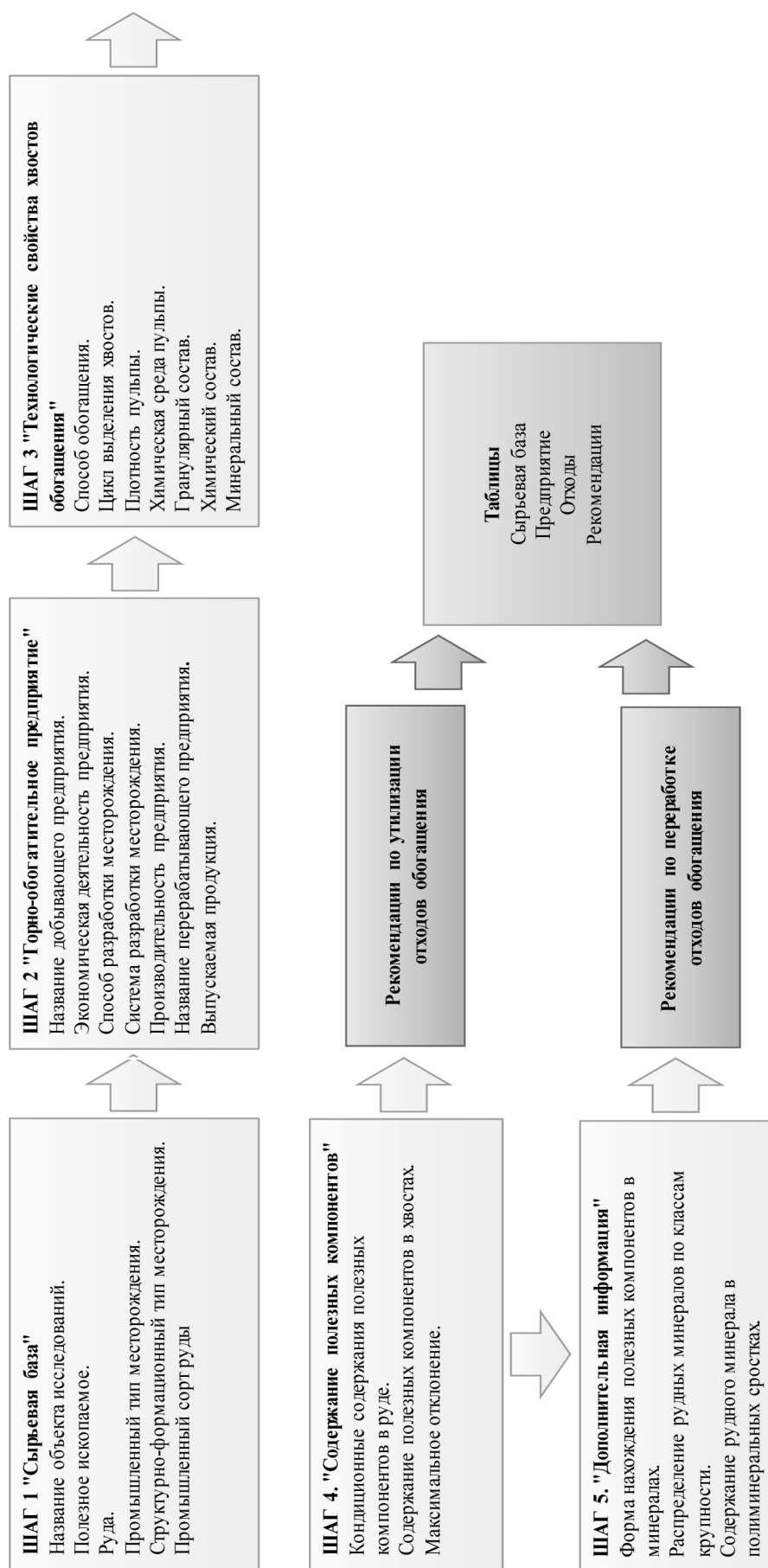


Рис. 1. Схема базы данных

Шаг 1 - Сырьевая база

Выберите характеристики сырьевой базы предприятия:

Название фасета: Хвосты обогащения колчеданных руд Учалинского месторождения

Полезные ископаемые: Руды

Руды: Медные, медно-цинковые

Промышленный тип месторождения: Медно-колчеданный

Структурно-формационный тип месторождения: Бесси, уральский (медно-цинковый)

Промышленный сорт руд: Медно-цинковый колчедан

Далее Отмена

Рис. 2. Окно информационного массива «Сырьевая база»

Шаг 2 - Горно-обогатительное предприятие

Выберите характеристики горно-обогатительного предприятия:

Название фасета: Хвосты обогащения колчеданных руд Учалинского месторождения

Горнодобывающее предприятие: ОАО "Учалинский ГОК"

Экономическая деятельность: Добыча полезных ископаемых

Способ разработки: комбинированный (открыто-подземный)

Система разработки: с закладкой выработанного пространства

Производительность, млн т руды/год: 1,5 – 2,0

Перерабатывающее предприятие: Учалинская ОФ

Выпускаемая продукция: медный и цинковый концентраты

Назад Далее Отмена

Рис. 3. Окно информационного массива «Горно-обогатительное предприятие»

Второй информационный массив «Горно-обогатительное предприятие» включает (рис. 3):

1. Полное название горнодобывающего предприятия.

2. Экономическая деятельность предприятия: сельское хозяйство, охота и лесное хозяйство; рыболовство, рыбоводство; добыча полезных ископаемых; обрабатывающие производства; производство и распределение электроэнергии, газа и воды; строительство; оптовая и розничная торговля; ремонт автотранспортных средств, мотоциклов, бытовых изделий и предметов личного пользования; гостиницы и рестораны; транспорт и связь; финансовая деятельность; операции с недвижимым имуществом, аренда и предостав-

ление услуг; государственное управление и обеспечение военной безопасности; обязательное социальное обеспечение; образование; здравоохранение и предоставление социальных услуг; предоставление прочих коммунальных, социальных и персональных услуг; предоставление услуг по ведению домашнего хозяйства; деятельность экстерриториальных организаций.

3. Способ разработки: открытый; подземный; комбинированный (открыто-подземный).

4. Система разработки: с закладкой выработанного пространства; без закладки выработанного пространства.

5. Производительность, млн т руды/год: менее 0,5; 0,5–1,0; 1,0–1,5; 1,5–2,0.



6. Полное название перерабатывающего предприятия.

7. Выпускаемая продукция: медный концентрат; медный и цинковый концентраты; др.

Третий информационный массив «Технологические свойства хвостов обогащения» по-

строен по фасетному принципу, включающий следующие характеристики: метод обогащения; стадийность; плотность пульпы; химическая среда пульпы; гранулярный состав; химический и минеральный состав хвостов обогащения (рис. 4).

Шаг 3 - Технологические свойства хвостов обогащения

Выберите параметры хвостов обогащения:

Название фасета: Хвосты обогащения колчеданных руд Учалинского месторождения

Метод обогащения: Флотационный (1)

Стадийность: 1 цикл (1)

Плотность пульпы, %: 15 - 20 (3)

Химическая среда пульпы: Щелочная (3)

Гранулярный состав, %: 20 - 30 (2)

Экономически выгодные для извлечения химические элементы:

Основной химический элемент: Медь (029)

Дополнительный химический элемент: Цинк (030)

Выберите компоненты минерального состава в порядке убывания значимости (не более пяти):

Сулфиды и их аналоги (1)  
Окислы и гидроокислы (2)  
Карбонаты (3)  
Силикаты (4)  
Сульфаты (5)  
Галоиды (6)  
Фосфаты (7)  
Вольфраматы (8)

Добавить >>  
Удалить  
Сброс

Идентификационный код: 2244303002905421

Назад Далее Отмена

Рис. 4. Окно информационного массива «Технологические свойства хвостов обогащения»

Шаг 4 - Содержание полезных компонентов

Экономически выгодные для извлечения полезные компоненты:

Основной химический элемент: медь (029)

Кондиционное содержание элемента в руде, %: 0.4

Содержание полезного компонента в хвостах, %: 0.32

Дополнительный химический элемент: цинк (030)

Кондиционное содержание элемента в руде, %: 1.0

Содержание полезного компонента в хвостах, %: 0.8

Задайте величину k для каждого полезного компонента:

Величина k характеризует максимальное отклонение содержания полезных компонентов в некондиционном сырье по сравнению с кондиционным, и ее значение принадлежит интервалу (0; 1)

k1 (медь (029)): 0.5

k2 (цинк (030)): 0.5

Назад Далее Отмена

Рис. 5. Таблица заполнения «Содержание полезного компонента»

Четвертый шаг определяет целесообразность извлечения полезных компонентов из отходов обогащения, для этого дополнительно вводится информация по кондиционному содержанию полезного компонента в рудах и содержанию этого компонента в хвостах обогащения, а также максимальное отклонение (**к**) **вышеперечисленных величин** (рис. 5). Значение коэффициента отклонения зависит от экономических показателей предприятия. Если целесообразность переработки

хвостов обогащения подтверждается, то следующим пятым шагом является ввод дополнительной информации по текущим хвостам обогащения с получением рекомендаций по переработке (рис. 6). Если целесообразность переработки хвостов обогащения не подтверждается, то текущие хвосты обогащения подлежат утилизации.

Программа базы данных завершается оформлением таблиц «Сырьевая база», «Предприятие», «Отходы» и «Рекомендации».

Рис. 6. Таблица «Рекомендации по переработке»

Предложенная база данных позволяет систематизировать и унифицировать информацию о текущих хвостах обогащения, предопределяющую выбор возможной технологии их перера-

ботки или утилизации. База данных является пополняемой и применима ко всем отходам обогатительного производства, не зависимо от исходного минерального сырья.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Методические указания НСОММИ № 183. Виды и последовательность минералогических работ при технологических испытаниях техногенного сырья (текущие хвосты обогащения колчеданных руд). – М.: ВИМС, 2014. С. 29.

2. Программное обеспечение экспертной системы по использованию хвостов обогащения. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013619389//ОБПБТ, 2013. № 4. С. 325.

## ОЦЕНКА МИНЕРАЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ТЕХНОГЕННОГО МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ЕГО ПЕРЕРАБОТКИ И СЕЛЕКТИВНОСТИ ДЕЗИНТЕГРАЦИИ

Шадрунова И. В.<sup>1</sup>, Колодежная Е. В.<sup>2</sup>, Ожогова Е. Г.<sup>3</sup>, Горлова О. Е.<sup>4</sup>

<sup>1</sup> ИПКОН РАН, г. Москва, <sup>2</sup> ЗАО «Урал-Омега», г. Магнитогорск,  
<sup>3</sup> ФГУП «ВИМС», г. Москва; <sup>4</sup> МГТУ им. Г. И. Носова, г. Магнитогорск

Анализ обеспеченности основных отраслей экономики разведанными запасами основных видов полезных ископаемых показывает, что при удовлетворительной в целом обеспеченности наметились проблемы минерально-сырьевой базы практически по каждой группе минераль-

ного сырья применительно к конкретным горнорудным районам и отдельным базовым предприятиям. В этих условиях накопленные и текущие отходы горного, обогатительного, металлургического производств, теплоэнергетики, представленные вскрышными, вмещающими поро-

дами, бедными, забалансовыми, некондиционными рудами, хвостами обогащения, техногенными россыпями, золами и шлаками тепловых электростанций, шлаками и шламами металлургического производства, обладают значительным ресурсным потенциалом и рассматриваются как перспективное резервное, заскладированное минеральное сырье [1].

Техногенные минеральные ресурсы, формируемые в течение многих лет из руд разных горизонтов и участков, нередко из руд разных месторождений, имеют сложный химический, минеральный петрографический состав, существенные различия в характере вкрапленности, взаимные срастания индивидов, в размерах и морфологии частиц, их окисленности, степени изменения поверхностных слоев под влиянием природных факторов (окисление, выщелачивание, выветривание), химических реагентов и в результате смешивания и т. п. Для вовлечения в промышленную переработку сложного, труднообогащаемого сырья необходимо установить закономерности влияния его строения, фазового состава, в том числе вторичной минерализации, физических и физико-химических свойств как отдельных минералов, так и руды в целом, обусловленных условиями их формирования и преобразования, на эффективность разделительных процессов для адаптации традиционных методов обогащения к техногенному сырью [2]. Поэтому минералого-технологическая оценка техногенного сырья должна производиться на основании новых научных знаний о специфично измененных технологических свойствах и преобразовании минеральных ассоциаций в процессе формирования и хранения техногенных ресурсов с использованием методов современной технологической минералогии для оценки его обогатимости и прогнозирования возможных схем переработки и технологических показателей.

Металлургические шлаки в значительной степени отличаются от природных руд по вещественному составу и свойствам, поэтому при прогнозировании технологий их вторичной переработки необходимо располагать максимально полной информацией о составе и свойствах всех шлакообразующих фаз [3]. Опыт введения в промышленную эксплуатацию сырьевых объектов металлургических шлаков свидетельствует, что переработка такого нового для большинства металлургических и обогатительных предприятий сырья сталкивается с технологическими трудно-

стями еще на стадии рудоподготовки, так как используемое в операциях дробления и измельчения стандартное горнорудное оборудование имеет низкую селективность дезинтеграции при высоких энергетических затратах.

Для оценки поведения шлаков под влиянием внешних нагрузок и обоснования наиболее рационального с точки зрения селективности и энергоемкости способа разрушения в аппаратах, реализующих различные схемы нагружения, необходима максимально полная информация о фазовом (минеральном) составе шлаков, гранулярном составе, морфометрических особенностях, характере распределения рудных минералов и агрегатов, их физических свойствах (твердости, хрупкости и пр.). Для этого проведено изучение фазового состава и структурных особенностей шлаков различного генезиса: сталеплавильных шлаков ОАО «ММК», медных шлаков ЗАО «Карабашмедь», никелевых шлаков комбинатов «Североникель» и «Печенганикель» [3]. Специфические особенности образования шлаков обуславливают их силикатный состав и присутствие необычных техногенных фаз, которые обычно не встречаются в природных объектах. В свою очередь от фазового состава шлаков зависит модуль их основности. Изучение фазового состава шлаков и особенностей их строения проводится комплексом минералогических методов (оптическая и электронная микроскопия и рентгенография). Виды и последовательность исследования обычно определяются его задачами.

В «Центре изучения вещества» (ИПКОН РАН, г. Москва) с помощью сканирующего электронного микроскопа Leo 1420 VP проведены исследования образцов шлаков ОАО «ММК», ЗАО «Карабашмедь», комбинатов «Североникель» и «Печенганикель». Качественный элементный анализ состава образца осуществляется установленным на микроскопе рентгеновским энергодисперсионным спектрометром INCA – 300 (Oxford Instruments, Великобритания).

Изученные шлаки представляют собой преимущественно силикатные образования с неравномерной вкрапленностью рудных техногенных фаз. Так, сталеплавильные шлаки ОАО «ММК» сформированы силикатами и алюмосиликатами преимущественно кальция, среди которых преобладает алит ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ), в подчиненном количестве присутствует мелилит  $\text{Ca}_2\text{Al}(\text{AlSiO})$ , представленные выделениями неправильной



формы со сглаженными очертаниями. Более поздней фазой, вероятно, является кордиерит  $(\text{Mg, Fe})_2\text{Al}_3(\text{AlSi}_5\text{O}_{18})$ , образовавшийся по ослабленным зонам (границам “зерен”), за счет чего имеет неправильную, заливообразную форму. Размер выделений кордиерита достигает 15 мкм. Иногда создается ложное впечатление, что кордиерит частично “обтекает” выделения алита. В шлакообразующей массе отмечаются немногочисленные рудные фазы каплевидной или близкой к ней формы в виде единичных вкраплений размером 1 – 2 мкм, приуроченные в основном к алитовой составляющей (рис. 1).

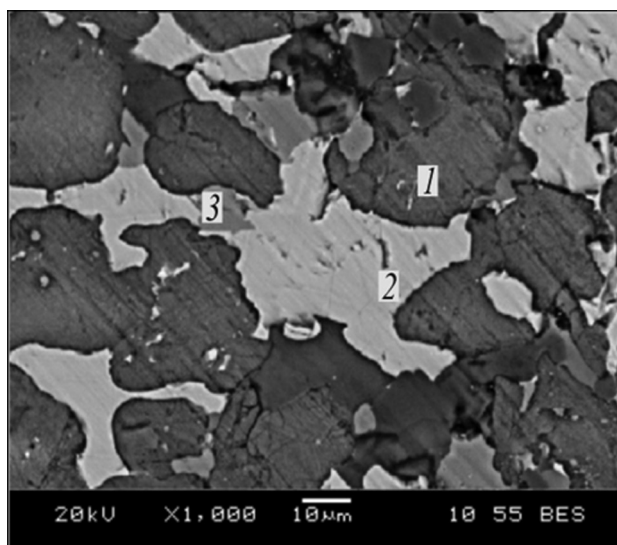


Рис. 1. Микрофотография и фазовый состав сталеплавильного шлака ОАО «ММК»:

1 – матрица – алит  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ; 2 – включения – меллит  $\text{Ca}_2\text{Al}(\text{AlSi}_5\text{O}_7)$ ; 3 – переходы замещения – кордиерит  $(\text{Mg, Fe})_2\text{Al}_3(\text{AlSi}_5\text{O}_{18})$

В шлаках комбината «Североникель» матрица представлена алюмосиликатом кальция  $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ . На рис. 2 четко фиксируются эвтектические колонии – структуры, состоящие из двух фаз, растущих совместно при их определенном кристаллоориентационном соответствии. Техногенные рудные фазы выполнены пирротинном, в структуру которого входит никель  $(\text{Fe, Ni})_9\text{S}_8$ , и цинковой шпинелью – ганитом  $\text{ZnO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ . Пирротин присутствует в виде индивидуализированных округлых и эллипсоидальных выделений разного размера, вокруг которых в виде каймы образуется ганит.

Гранулированный никельсодержащий шлак комбината «Печенганикель» представляет собой стекловидное вещество, в различной степени насыщенное рудными техногенными фазами. Основной шлакообразующей фазой является це-

олитоподобный алюмосиликат  $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$  (рис. 3). Наблюдается формирование ориентированной эвтектической структуры. Рудная фаза представлена пирротинном округлой формы разного размера, вокруг крупных выделений которого иногда отмечается прерывистая кайма ганита.

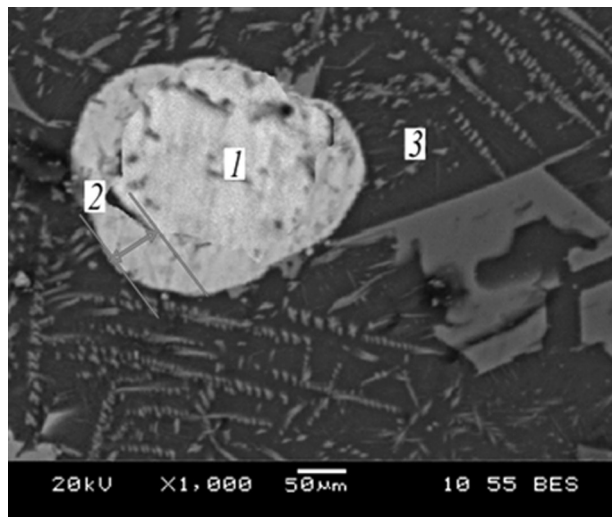


Рис. 2. Микрофотография и фазовый состав отвального никелевого шлака комбината «Североникель»: 1 – никеленосный пирротин; 2 – реакционная каемка – цинковая шпинель  $\text{ZnO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ; 3 – матрица – алюмосиликат  $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$  с примесями Zn, Cr, Al

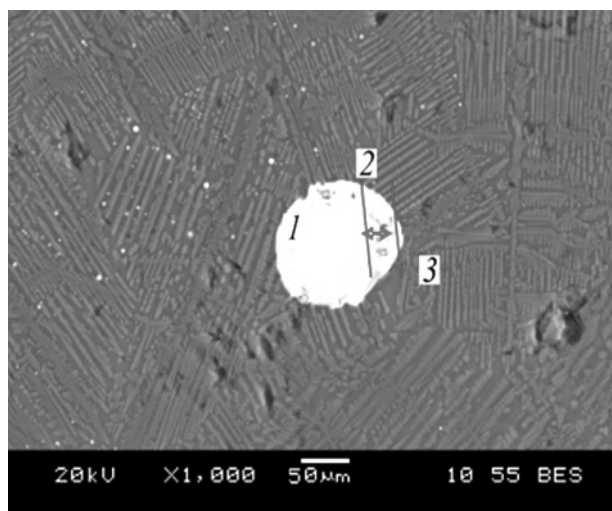


Рис. 3. Микрофотография и фазовый состав гранулированного никелевого шлака комбината «Печенганикель»: 1 – никеленосный пирротин; 2 – реакционная каемка – цинковая шпинель  $\text{ZnO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ; 3 – матрица – алюмосиликат  $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$  с примесями Zn, Cr, Al

Металлургические шлаки ЗАО «Карабаш-медь» сформированы фаялитом  $2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$

в структуру которого, возможно, изоморфно входит цинк. Четко фиксируется техногенная структура фаялитовой матрицы, наблюдаются таблитчатые и пластинчатые зерна фаялита и панидиоморфные зерна вюститита. Также в шлакообразующей матрице идентифицируется силикат цинка – виллемит ( $Zn_2SiO_4$ ). Шлаки отличаются значительным количеством рудных фаз, распределенных неравномерно и имеющих разные размеры. Медь присутствует в виде самородной меди и сульфидных минералов (халькопирит  $CuFeS_2$ , борнит  $Cu_5FeS_4$ ). Самородная медь имеет кубооктаэдрическую форму, размер выделений достигает 200 мкм в диаметре, нередко вокруг отмечаются ганитовые каемки. На долю сульфидных минералов приходится до 20 % меди от всего металла в шлаке. Они присутствуют в виде зерен практически идиоморфной или округлой формы размером 1 мкм и менее (рис. 4).

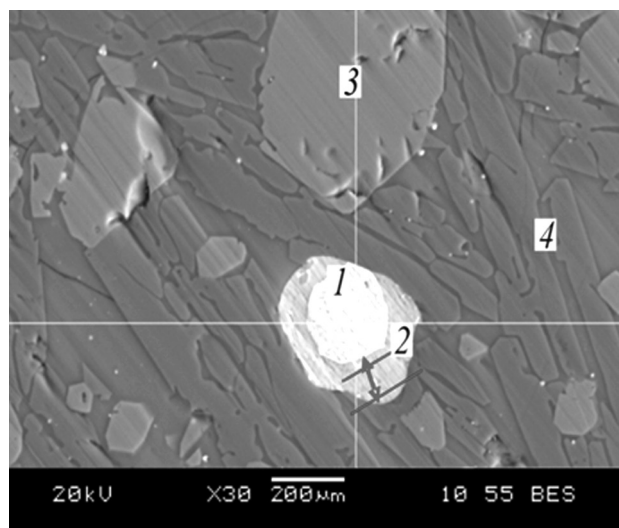


Рис. 4. Микрофотография и фазовый состав медного шлака ЗАО «Карабашмедь»: 1 – металлическая медь; 2 – цинковая шпинель  $ZnO \cdot Al_2O_3$ ; 3 – матрица – фаялит  $FeO \cdot SiO_2$  с примесями  $2ZnO \cdot SiO_2$ ; 4 – вюстит  $FeO$  с примесями  $Zn, Cr, Al$

Из изложенного следует, что шлаки сформированы в основном силикатными и алюмосиликатными фазами, содержащими петрогенные элементы: кальций, магний, железо, хром. В ста-

леплавильных шлаках матрица отличается более сложным составом и в ней фиксируется более поздняя фаза, представленная кордиеритом. В шлаках цветной металлургии матрица может быть представлена как алюмосиликатными фазами переменного состава, так и железосодержащим оливином – фаялитом. Отличительной особенностью шлаков переработки цветных металлов является наличие эвтектических структур и присутствие ганита, механизм образования которого недостаточно ясен. Наличие индивидуализированных рудных фаз с четкими границами благоприятно влияет на их высвобождение из шлакообразующей матрицы при дезинтеграции.

Морфоструктурные параметры перерабатываемого сырья, к которым можно отнести массовый гранулярный состав рудных минералов, определяющий граничную крупность материала при дезинтеграции, морфометрические характеристики (фактор формы, удлинение), влияющие на их раскрываемость, предопределяют необходимую тонину помола при рудоподготовке, дальнейшие операции обогащения, их стадийность и позволяют прогнозировать концентрацию и перераспределение металлов в продуктах дезинтеграции. При изучении морфоструктурных параметров рудных минералов шлаков опикогеометрическим методом (система анализа изображений SIAMS-600) установлено (табл. 1), что они имеют фактор формы, близкий к 1 (0,7–0,92), свидетельствующий об изометричной (округлой) форме рудных выделений с четкими ровными границами. В шлаках не обнаружено сложных, в том числе эмульсионных, срастаний рудных минералов со шлакообразующей матрицей, снижающих эффективность обогащения. Размер (массовый гранулярный состав) рудных фаз варьирует от 60 до 352 мкм, неметаллические (шлаковообразующие) выделения имеют размер менее 500 мкм, их соотношение по средним размерам равно 0,2–0,6. Средний размер рудных зерен соответствует приемлемой крупности для современных гравитационных, флотационных и магнитных обогатительных аппаратов.

Таблица 1. Морфоструктурные параметры шлаков

Сталеплавильный шлак ОАО «ММК»	Никелевый шлак комбината «Североникель»	Никелевый шлак комбината «Печенганикель»	Медный шлак ЗАО «Карабашмедь»
Фактор формы рудных минералов			
CF = 0,74	CF = 0,89	CF = 0,81	CF = 0,92
Распределение размеров рудных минералов			
$D_{cp} = 84$ мкм	$D_{cp} = 63$ мкм	$D_{cp} = 127$ мкм	$D_{cp} = 352$ мкм

Существенное различие форм и размеров зерен рудных минералов и силикатной матрицы в исследуемых шлаках предопределяет их неодинаковое поведение при ударном нагружении, реализуемом в аппаратах центробежно-ударного дробления. Разрушение куска материала свободным ударом происходит наиболее селективно, по плоскостям срастания зерен минералов с наведением широкой сети микротрещин.

Изучение фазового состава и морфоструктурных характеристик техногенного сырья – шлаков черной и цветной металлургии различного генезиса – показало, что они представляют собой гетерогенный материал с резко различающимися свойствами и морфометрическими параметрами отдельных фаз. Это создает предпосылки селективного разрушения структурно неоднородных материалов в аппаратах центробежно-ударного дробления, так как именно такой способ дезинтеграции обеспечивает наиболее полное раскрытие сложных минеральных комплексов по границам срастания фаз, а, следовательно, и более высокие показатели последующего обогащения труднообогатимого техногенного сырья.

Другим примером использования средств современной технологической минералогии для обоснования наиболее рационального способа рудоподготовки и последующего обогащения труднообогатимого сырья могут служить проведенные микроскопические исследования техногенного марганецсодержащего сырья. Приоритетной задачей при переработке природного и техногенного марганецсодержащего сырья является разработка технологических схем, основанных на использовании сухих методов обогащения сырья, при этом на стадии рудоподготовки необходимо осуществлять раскрытие сростков рудных и нерудных минералов по границам раздела фаз без переизмельчения для предотвращения перехода марганцевых минералов в шламовую фракцию. Выполнена оценка возможности переработки отходов обогащения марганцевых руд по технологической схеме, включающей сухое измельчение материала в центробежно-ударной мельнице, классификацию измельченного материала в воздушной среде и магнитную сепарацию классифицированного материала в сильном магнитном поле, на пробе лежалых хвостов обогащения марганцевых руд, отобранных из шламохранилища. Массовая доля марганца в хвостах составляет – 9,5 %, что значительно ниже, чем в рудах промышленного типа.

Анализ распределения марганца по классам крупности в исходном материале показывает, что материал крупностью менее 0,16 мм обогащен марганцем по сравнению с другими классами крупности. Расчетная массовая доля марганца в классе – 0,16 мм составляет 17,1 %. Поэтому удаление частиц шламовых размеров из материала необходимо проводить селективно, минимизировав вынос зерен богатых марганцем. Это возможно осуществить при помоле материала в измельчительном комплексе КИ, который сочетает в себе операции центробежно-ударного измельчения сухого материала и его динамической классификации, осуществляемые в одном аппарате. Испытания проводились при окружной скорости вращения ускорителя 70 м/с. Разделение материала осуществлялось по границе 0,040 мм с получением крупного и мелкого продуктов после измельчения и классификации.

Для оценки эффективности дезинтеграции данного сырья в аппаратах центробежно-ударного разрушения провели оценку раскрываемости сростков рудных и нерудных минералов в крупных продуктах измельчительного комплекса КИ при различной крупности помола материала с помощью автоматизированного комплекса SIAMS Photolab. Анализ фрагментов микроструктуры образцов крупных продуктов измельчения и классификации марганецсодержащего материала измельченных до крупности менее 1,0 мм, 0,5 мм, 0,315 мм осуществлялся с использованием анализатора Минерал С7, предназначенного для автоматического оптико-геометрического анализа сырья по аншлифам, прозрачным шлифам и шлиховым пробам. На рисунке 5 представлены микрофотографии полей изученных проб.

По результатам изучения поверхностей, представленных на фото, получили, что основными рудными минералами марганецсодержащего материала Жездинской ОФ являются браунит (22,2 %), псиломелан (12,5 %) и пиролюзит (8,1 %), а основными породными минералами являются кварц и полевошпат (57,1 %), а также в меньшем количестве магнетит (0,1 %) и доломит (следы). Зерна рудных минералов псиломелана и пиролюзита, а также зерна кварца имеют преимущественную крупность частиц более 190 мкм. Свободные зерна браунита имеют несколько меньшие размеры – 74–190 мкм. Крупность сростков рудных минералов с кварцем и полевошпатом составляет 190–500 мкм, следовательно, обогащение марганецсодержащего материала без предваритель-



ного раскрытия сростков основных рудных минералов не представляется возможным, а раскрытие

сростков данных минералов следует ожидать при крупности измельчения 0,16 – 0,5 мм.

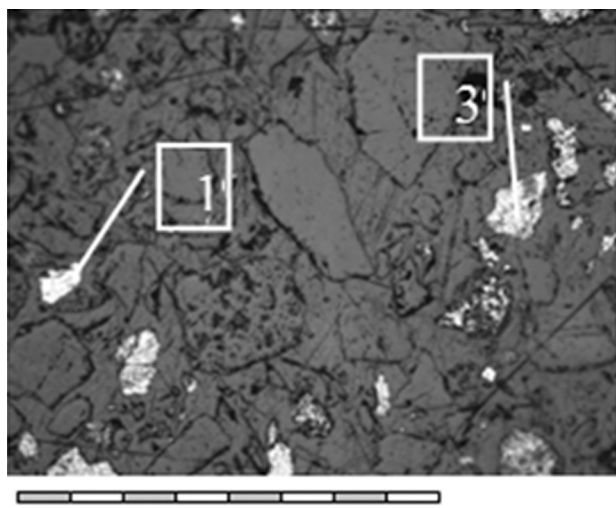
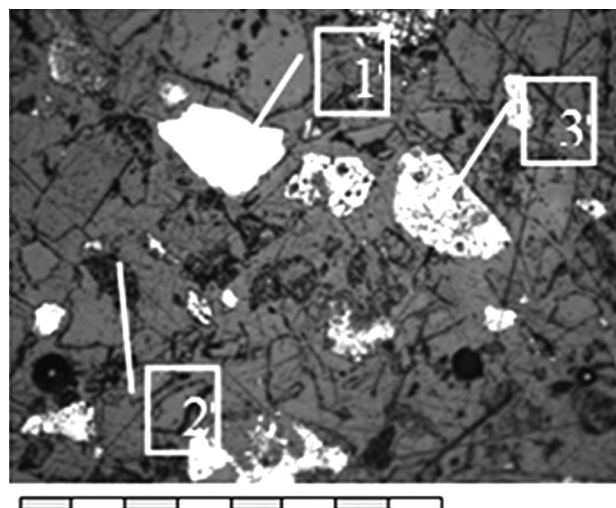
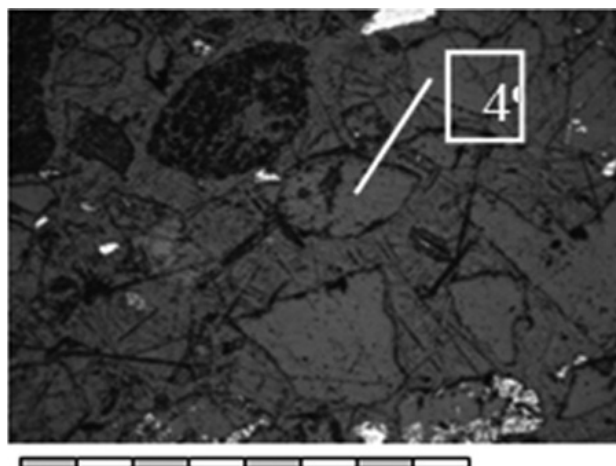
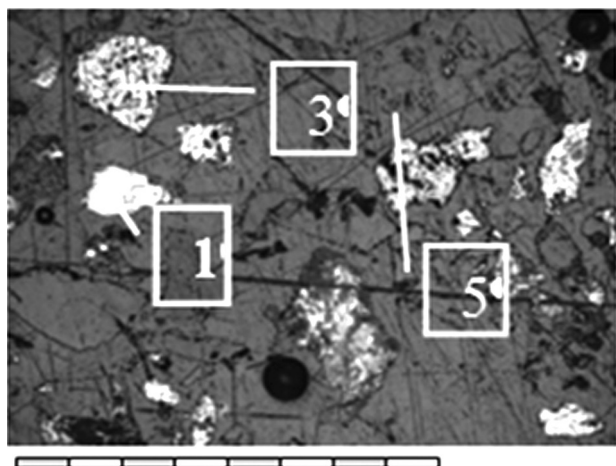


Рис. 5. Микроструктура марганецсодержащего материала (Увел. 100): 1 – браунит; 2 – псиломелан; 3 – пироюзит; 4 – кварц (полево шпат); 5 – магнетит

В исходной пробе 51,7 % наблюдаемых зерен материала находилось в свободной форме, а после измельчения материала в центробежно-ударной мельнице до крупности 1,0 мм и классификации по границе 0,040 мм количество свободных зерен рудных минералов и кварца составило 64,5 % (табл. 2).

При центробежно-ударном измельчении наблюдается селективное раскрытие более мягких рудных марганцевых минералов: количество свободных зерен браунита увеличилось с 8,1 % до 63,9 %, а псиломелана с 68,1 % до 71,7 %. При этом количество свободных зерен кварца в материале увеличились незначительно с 61,0 % до 66,6 %.

При измельчении материала до крупности 0,5 мм количество свободных зерен рудных минералов и кварца возросло до 69,5 %. При уменьшении крупности помола материала до 0,5 мм проис-

ходит также уменьшение размеров свободных зерен кварца до 125–190 мкм (40,6 %), в то время как преимущественная крупность свободных зерен рудных минералов остается равной 190 мкм. Это свидетельствует о раскрытии сростков рудных минералов с кварцем, то есть о селективном разрушении минералов, обладающих наиболее контрастными физико-механическими свойствами.

При измельчении материала до 0,315 мм количество свободных зерен рудных минералов и кварца возросло до 82,9 %, что является достаточным для эффективного обогащения материала. Однако также наблюдается уменьшение размеров раскрытых зерен: 48,4 % свободных зерен рудных минералов имеют размер 74–125 мкм, что может свидетельствовать о возможном их переизмельчении при дальнейшем снижении крупности измельчения.

**Таблица 2. Раскрываемость рудных зерен в процессе центробежно-ударного измельчения хвостов обогащения марганцевых руд**

Свободные минералы, сростки	Выход, %	Распределение по размерам зерен, %					
		0–10 мкм	10–44 мкм	44–74 мкм	74–125 мкм	125–190 мкм	>190 мкм
Исходный материал							
Рудные свободные зерна	14,2	9,9	3,4	3,1	8,8	26,8	48,0
Породные свободные зерна	37,5	1,1	3,1	3,7	15,5	28,8	47,9
Сростки	48,3	3,3	6,8	6,0	12,7	21,4	49,9
Измельченный до 1,0 мм							
Рудные свободные зерна	25,4	0,6	4,4	4,4	24,1	15,5	51,1
Породные свободные зерна	39,1	0,2	0,5	2,0	13,1	24,2	60,1
Сростки	35,5	0,6	2,0	2,5	6,2	22,6	66,0
Измельченный до 0,5 мм							
Рудные свободные зерна	32,5	0,2	2,6	8,6	25,5	22,6	40,5
Породные свободные зерна	37,0	0,0	0,6	6,0	23,6	40,6	29,2
Сростки	30,5	0,1	5,0	3,9	22,4	21,6	47,0
Измельченный до 0,315 мм							
Рудные свободные зерна	32,2	0,0	4,7	23,0	48,4	18,6	5,2
Породные свободные зерна	50,7	0,0	1,6	9,7	35,6	34,8	18,3
Сростки	17,1	0,4	2,9	9,8	28,3	23,6	35,0

На основании анализа раскрываемости рудных и нерудных минералов и характера прироста свободных зерен основных минералов при различной тонине помола рекомендуемая крупность измельчения марганецсодержащего материала Жездинской ОФ перед последующим обогащением составляет 0,5–0,315 мм. Результаты магнитной сепарации материала указанной крупности свидетельствуют о том, что глуби-

на обогащения марганецсодержащего материала должна быть 0,5 мм. При магнитной сепарации материала, измельченного в центробежно-ударной мельнице до крупности менее 0,5 мм, получен магнитный продукт, выход которого составил 23,46 %, при массовой доле марганца 32,34 %, что сопоставимо по качеству с марганцевыми концентратами из окисленных руд (табл. 3).

**Таблица 3. Показатели сухой магнитной сепарации марганецсодержащих хвостов различной крупности**

Продукты обогащения	Выход, %	Массовая доля Mn, %	Извлечение Mn, %
<b>Крупность материала 0,5–0мм</b>			
Магнитный продукт	23,46	32,34	72,96
Немагнитный продукт	63,07	3,18	19,28
Отвальные хвосты	7,47	2,45	1,76
Исходный материал	94,0	10,40	94,0
<b>Крупность материала 0,315–0мм</b>			
Магнитный продукт	23,3	29,72	69,7
Немагнитный продукт	51,45	3,92	20,30
Отвальные хвосты	18,45	1,72	3,2
Исходный материал	93,2	9,93	93,2

Таким образом, как показывает опыт работы последнего десятилетия, в современных условиях особенно возрастает роль экспрессной технологической оценки минерального сырья, позволяющей прогнозировать его обогатимость. Минералого-технологическая оценка текстурно-структурных параметров исходного сырья и продуктов дезинтеграции, проведенная на первич-

ных этапах исследования обогатимости техногенного сырья, позволяет ответить на вопрос о целесообразности вовлечения в переработку дополнительных, ранее не используемых георесурсов, а также обосновывать наиболее рациональный способ дезинтеграции труднообогатимого минерального сырья и прогнозировать результаты его обогащения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шадрунова И. В., Волкова Н. А., Мاستюгин С. А., Горлова О. Е. Технологические, экономические и экологические аспекты переработки техногенного сырья горно-металлургических предприятий Урала // Экология и промышленность России. 2013. № 8. С. 16–21.

2. Чантурия В. А., Шадрунова И. В., Горлова О. Е. Адаптация разделительных процессов обогаще-

ния полезных ископаемых к техногенному сырью: проблемы и решения // Обогащение руд. 2012. № 5. С. 43–49.

3. Шадрунова И. В., Ожогина Е. Г., Колодежная Е. В., Горлова О. Е. Оценка селективности дезинтеграции металлургических шлаков // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2013. № 5. С. 180–190.

## МИНЕРАЛОГИЧЕСКОЕ ГЕОМАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ: РАЦИОНАЛЬНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИРОДНОГО И ТЕХНОГЕННОГО МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

*Котова О. Б.*

*ИГ Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар; kotova@geo.komisc.ru*

Минералы продукты природных и техногенных процессов, в прикладной минералогии рассматриваются как геоматериалы, которые используются для решения конкретных технологических задач. Становление и развитие минералогического геоматериаловедения относят ко второй половине прошлого века и связывают с революционным развитием технологического прогресса (ядерные технологии, инструментальная база, наноиндустрия и т. д.) и возросшей потребностью общества в минеральном сырье. Академик Н. П. Юшкин отмечал, что это научное направление о природе, свойствах, технологическом поведении, изменении и разрушении геоматериалов в процессе технического функционирования стало общепризнанным, имеет свои задачи и методы их решения, полностью отражает новые требования к исследованию минерала для успешного решения минерально-сырьевых проблем [1]. Только полный совместный учет природных и техногенных качеств открывает возможность рационального использования сырья и интенсивного ведения технических процессов [2], что составляет **основную цель** минералогического геоматериаловедения.

С выходом России на мировой рынок резко повысились требования как к технологическим, так и к экологическим параметрам товарного продукта. Все это обуславливает необходимость, во-первых, получения глубоких знаний о минералах как о носителях необходимых химических элементов и полезных свойств, особенностях их реальной кристаллической структуры; во-вторых, понимания механизмов изменений

параметров минералов под влиянием природных и техногенных воздействий; в-третьих, получения готовой продукции, конкурентоспособной на мировом рынке.

Основными конкурентами геоматериалам являются материалы на синтетической основе и, соответственно, их химические способы получения. Мировая индустрия материалов на синтетическом сырье достигла высоких результатов. Такой материал часто превосходит по технологическим показателям природный. Но нельзя забывать, что, как правило, это связано с дорогостоящим производством, вредными химическими реагентами, нарушением экологии. Сегодня требуются креативные, практичные, надежные решения. Именно таким решением являются геоматериалы. Они обладают такими качествами, как универсальность, экономичность, экологичность, долговечность.

Развитие индустрии, использующей геоматериалы, обеспечивается минерально-сырьевым потенциалом страны и физико-химическими основами технологий его освоения. Важным критерием рационального использования минерального сырья является оценка его комплексности. Информация о технических и технологических свойствах геоматериала «хранится» в самом минерале на различных уровнях его структурной организации и выражается в сорбционных, морфоструктурных, электрических и др. свойствах. В работах А. И. Гинзбурга, Д. П. Григорьева, В. И. Ревнивцева,

Н. П. Юшкиным отмечено, что технологическая оценка минерального сырья полностью



основана на минералогических критериях и «тестово-прогнозом» подходе минералогических методов исследований (TEM, XAS, XRD, и т. д.) с целью мониторинга физико-химических свойств в процессе технологического модифицирования до получения конечного продукта [3].

**Главные (стратегические) задачи** минералогического геоматериаловедения заключаются в объединении усилий специалистов смежных научных направлений (геологов, минералогов, кристаллографов, химиков, физиков, технологов и др.), развитии теоретических и экспериментальных основ технологий освоения минерально-сырьевых ресурсов, выявлении фундаментальных закономерностей образования и свойств природных и техногенных структур (включая наноразмерные фазы), их кинетических и динамических особенностей в технологических процессах, разработке способов направленного изменения и разрушения геоматериалов в процессе технологического функционирования как основы синтеза новых материалов и создания наукоемких технологий. В результате совместных междисциплинарных исследований разрабатывается единый подход эффективного освоения минерально-сырьевого потенциала конкретного региона.

**Инновационность** таких исследований заключается в выявлении перспективных геоматериалов и продуктов технологий их переработки с учетом вещественного состава и механизмов модифицирования с целью расширения потребительских возможностей конечного продукта. Для получения новых фундаментальных и прикладных результатов рассматриваются природные соединения и их синтетические аналоги, включая ультрадисперсное минеральное (природное и техногенное) вещество (титановые, алюминиевые и другие руды, углеводородное и нерудное сырье (анальцит-монтмориллонитовые породы, природные битумы и др.), угольные, бокситовые и другие отходы).

Установление физико-химических закономерностей процессов формирования структуры **композиционных материалов** на основе полимерных матриц и высокодисперсных наполнителей позволяет проектировать материалы с заданными свойствами. Доказано значительное влияние строения наполнителя на свойства композиционного продукта на примере системы эпоксидная смола – неорганический наполнитель. Одним из перспективных направлений модификации эпоксиполимерной матрицы является использование

природных слоистых и пористых силикатов, в частности монтмориллонита и цеолитов [4].

Как составная часть минералогического геоматериаловедения развивается **экспериментальное моделирование** структурных преобразований геоматериалов в процессе **технологического модифицирования** и **синтез** ценных минералов (аналогов природным, но с контролируемым составом) для эффективного использования полученных материалов в наукоемких технологиях современной индустрии. Успехи этого направления исследований дают возможность применить знания, полученные в экспериментах на модельных объектах, в реальных производственных схемах.

Например, органические минералоиды (твердые битумы, ископаемые смолы и др.) в зависимости от различного рода воздействий на них (термического, радиационного, ударного) представляются перспективными моделями для изучения механизмов перехода минеральных систем из аморфного состояния к упорядоченным структурам, выявления фундаментальных закономерностей строения на молекулярном и надмолекулярном уровнях, их структурных преобразований [5].

Опал оказался великолепным тестовым объектом для создания фундаментальных основ экспериментального моделирования и синтеза, развития гипотез о механизмах формирования надмолекулярных структур [6]. Начатые в 70-х гг. прошлого века исследования по получению искусственных аналогов природного благородного опала позволили разработать технологии синтеза практически любых разновидностей природного благородного опала. Интересно, что первые работы по синтезу рубина (первый синтезированный минерал, промышленный выпуск которого был организован в 1910 г.) встречаются уже в конце XIX века.

Существенные успехи, в том числе в ИГ Коми НЦ УрО РАН, достигнуты в экспериментах по облагораживанию драгоценного и полудрагоценного сырья в результате различного рода энергетических воздействий (гамма- и рентгеновского облучения, обжига), позволивших изменять окраску минералов в широком спектральном интервале. В зависимости от процессов технологического модифицирования (облучения, обжига), их последовательности и режимов невзрачный природный пренит превращается в красивый камень яркого зеленого цвета или приобретает густую янтарно-желтую окраску и может быть использован для улучшения декоративности и

потребительского качества ювелирных изделий. Эти работы были отмечены дипломами ВДНХ. Запатентованы способы изменения окраски агатов. Получены и другие патенты в области облагораживания минералов (рис. 1, 2) [7]. Нами

проводились работы по использованию УЗ-воздействия на природные агатовые пластинки. Была разработана установка и проведены первые эксперименты. Удалось получить заданный рисунок в первых слоях агатовой пластинки.

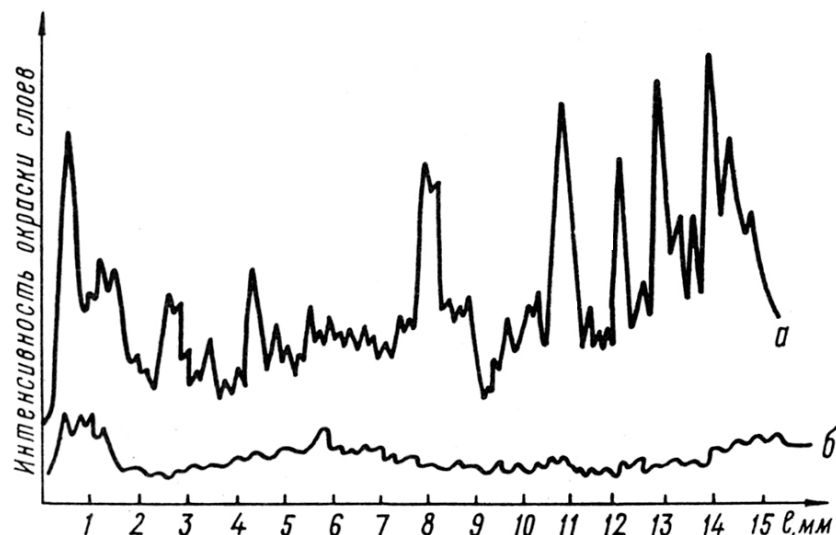


Рис. 1. Кривые светопропускания агатов: а – облагороженный агат, б – природный обесцвеченный агат

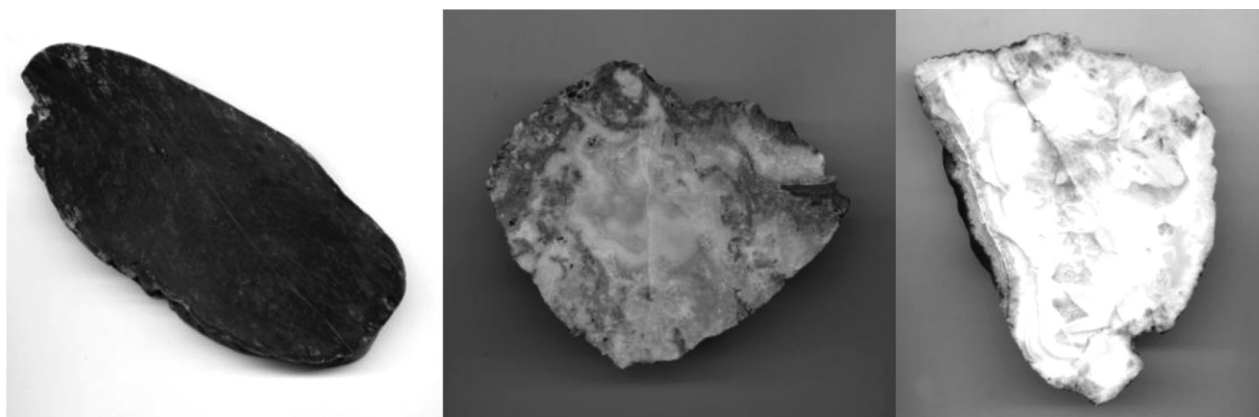


Рис. 2. Пренит и агат. Тиман, Россия

Основные цели технологического модифицирования – перевод некондиционного камнесамоцветного сырья в кондиционную категорию. Таким образом обеспечивается прирост запасов месторождений драгоценных камней.

Вовлечение тонкодисперсных руд в технологические процессы привлекли внимание ученых к **поверхностным явлениям в гетерогенных системах** и их физико-химическим следствиям [8]. Исследования в этом направлении показали, что размерные факторы влияют на конституционные особенности и свойства минералов. Выявлена зависимость морфологии и свойств от размеров индивидов. Появился еще один объект

исследования в технологической минералогии – нанотехническое минеральное сырье.

При освоении геоматериалов техногенных образований, которые становятся новым видом сырья и составной частью экологической проблемы, достаточно широко используется наноструктурирование материалов как перспективный способ его модифицирования. Особый интерес представляет минералогия и кристаллохимия шлаков для понимания механизмов происхождения руды и Р, Т-условий технологических режимов. В настоящее время зола, например, используется в строительной промышленности, в косметологии и т. д. Ведутся работы по синтезу цеолитов из золы [9].

Высокий уровень современных экспериментальных технологий дает возможность получить практически любой синтетический материал, но всегда актуален вопрос о приоритетности (целесообразности) использования природного минерального сырья или его синтетического аналога. Как правило, синтетическое сырье получают в результате использования дорогостоящих тех-

нологий и достаточно вредных химических реагентов. Природное сырье (цеолиты, монтмориллониты, опал и др.) при незначительном и недорогом модифицировании их физико-химических свойств (сорбционных, радиационных и др.) могут служить прекрасной основой для конкурентоспособных материалов (competitive materials) (рис. 3).



Рис. 3. Фабрика по переработке клиноптилолита. Западные Карпаты, Венгрия

Например, анализимсодержащие породы являются прекрасными фильтрами при очистке воды от разного рода загрязнений. Работы Института геологии КомиНЦ УрО РАН в этом направлении отмечены наградами выставок инновационных разработок республиканского, уральского и российского уровней [10]. Анализим (рис. 4) пополнил список пьезоэлектриков – материалов, свойства которых используются в электронной, военной промышленности. Проводятся детальные исследования.

В тоже время некоторые синтетические аналоги превосходят по техническим показателям природное минеральное сырье, например, оптический кварц. В этом случае ведутся работы по развитию и удешевлению технологий переработки.



Рис. 4. Анализим. Средний Тиман, Россия



Б. А. Голдин широко использовал методы минералогического геоматериаловедения и отмечал, что технические свойства геоматериалов должны иметь четкий физический смысл с целью наиболее эффективных способов их отра-

ботки [10, 11 и др.]. В решении этой задачи значительная роль принадлежит технологической минералогии.

*Работа выполнена при поддержке программ УрО РАН*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Юшкин Н. П. Геоматериалы, минералогическое геоматериаловедение, ресурсные и технологические проблемы // Геоматериалы для высоких технологий, алмазы, благородные металлы, самоцветы Тимано-Североуральского региона: Материалы Всероссийского минералогического семинара с международным участием. Сыктывкар: Геопринт, 2010. С. 7–8.
2. Григорьев Д. П. Соотношение технологической минералогии с сопредельными отраслями знания // Онтогенез минералов и технологическая минералогия. Киев: Наукова думка, 1988. С. 11–15.
3. Юшкин Н. П. Минералогические критерии технологической оценки природного (и техногенного) сырья для получения искусственных минералов // Технологическая минералогия главнейших типов месторождений. Л.: Наука, 1987. С. 9–14.
4. Ситников П. А., Васенева И. Н., Белых А. Г., Котова О. Б., Шушков Д. А., Рябков Ю. И., Кучин А. В. Моделирование и разработка технологических параметров получения эпоксидного композиционного материала с содержанием анальцим-монтмориллонитовой породы // Известия Коми научного центра УрО РАН. Вып. 4 (8). Сыктывкар, 2011. С. 15–18.
5. Мартиросян О. В., Голубев Е. А. Изменения надмолекулярной структуры асфальтита м высшего антраксолита при высокоэнергетическом радиационном воздействии // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН, 2012. № 6. С. 22–24.4. Перспективные геотехнологии // Отв. редактор Н. П. Юшкин – СПб.: Наука, 2010. С. 376.
6. Kamashev D. V. The influence of synthesis conditions on the packing of the spherical particles of silica in a supramolecular structure // Journal of Optoelectronics and Advanced Materials. V. 9, 5. 2007. P. 1435–1436.
7. Перспективные геотехнологии // Отв. редактор Н. П. Юшкин – СПб.: Наука, 2010. С. 376.
8. Обогащение тонкодисперсных руд. – Сыктывкар, 1992. – 72 с. (Тр. Ин-та геологии Коми научного центра УрО Российской академии наук; вып. 80).
9. Шушков Д. А., Тропников Е. М. Получение цеолитов из золы // Структура, вещество, история литосферы Тимано-Североуральского сегмента: Материалы 20-й научной конференции. Сыктывкар: Геопринт, 2011. С. 214–217.
10. Шушков Д. А., Котова О. Б., Наумко И. М., Бондар Р. А., Матвишин З. Г. Цеолиты: структура, свойства, генезис, применение (на примере клиноптилолитовых туфов Карпат и анальцимсодержащих пород Тимана) // Разведка и охрана недр, 2011. № 1. С. 27–34.
11. D. A. Shushkov, O. B. Kotova, B. A. Goldin Geomaterials on the Basis of Analcime-Bearing Rocks // Geomaterials, 2011. № 1. P. 33–40.
12. Назарова Л. Ю., Рябков Ю. И., Секушин Н. А., Голдин Б. А., Бурцев И. Н., Осмоловский М. Г. Ильменитсодержащее сырье для радиопоглощающих материалов // Минералогические перспективы: Материалы международного минералогического семинара. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2011. С. 339–342.

## ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ЖЕЛЕЗНЫХ РУД МЕСТОРОЖДЕНИЯ ГУРВУНУР

*Астахова Ю. М., Быстров И. Г., Сорокин Е. М., Ожогина Е. Г, Рузский В. В.*

*ФГУП «ВИМС им. Н. М. Федоровского», г. Москва*

В настоящее время в связи с вовлечением в промышленную переработку месторождений железных руд, ранее считавшихся труднообогатимыми и неперспективными, проводится их геолого-экономическая переоценка. Такая оценка позволяет получать полные данные о составе и технологических свойствах руды и прогнозировать технологию ее переработки и качество ожидаемых продуктов. В настоящее время прогнозная оценка ка-

чества руд на ранних стадиях ГРП нередко проводится комплексом методов минералогического анализа, включающий оптическую микроскопию, рентгенографический, растровую электронную микроскопию и другие виды анализов.

Гурвунурское месторождение входит в Озернинский рудный узел, который расположен в центральной части Курбино-Еравнинской структурно-металлогенической зоны, относя-



щейся к Саяно-Байкальской металлогенической провинции. Озернинский рудный узел характеризуется сложным геологическим строением и представлен останцом кровли нижнекембрийских образований в поле развития палеозойских гранитоидов. Месторождение представлено кварц-магнетитовыми и пироксен-апатит-магнетитовыми рудами. Кварц-магнетитовые руды наиболее распространены и на их долю приходится около 95 % общих запасов. Пироксен-апатит-магнетитовые руды образуют прослои мощностью 0,5–2,0 м среди кварц-магнетитовых руд вблизи диоритовых массивов.

Прогноз минералого-технологических особенностей руды проведен на основе минералогического изучения кварц – магнетитовой руды, сформированной кусками руды темно-серого, коричневатого-черного и черного цвета размером от 3 до 7 см. Руда характеризуется массивным и массивно-пятнистым строением. Визуально пят-

нистость руд обусловлена наличием бурых пятен гидроксидов железа. Массивная руда обычно представляет собой мелко- или среднекристаллические магнетитовые агрегаты с резко подчиненным содержанием порообразующих минералов. Реже отмечаются полосчатые и прожилковые руды. При этом прожилковые руды отличаются наличием разно-ориентированных и различных по мощности прожилков средне- и мелкокристаллического кварца. Структура руды в целом аллотриоморфнозернистая, значительно реже пойкилитовая. Руды неравномерно-кристаллические, мелко- среднекристаллические: мелкокристаллический магнетит равномерно рассеян в породе, а среднекристаллический магнетит образует рассеянную вкрапленность в основной массе (рис. 1). В руде развиты вторичные коррозионные структуры (ажурные, каемчатые, петельчатые), связанные с процессами мартитизации.

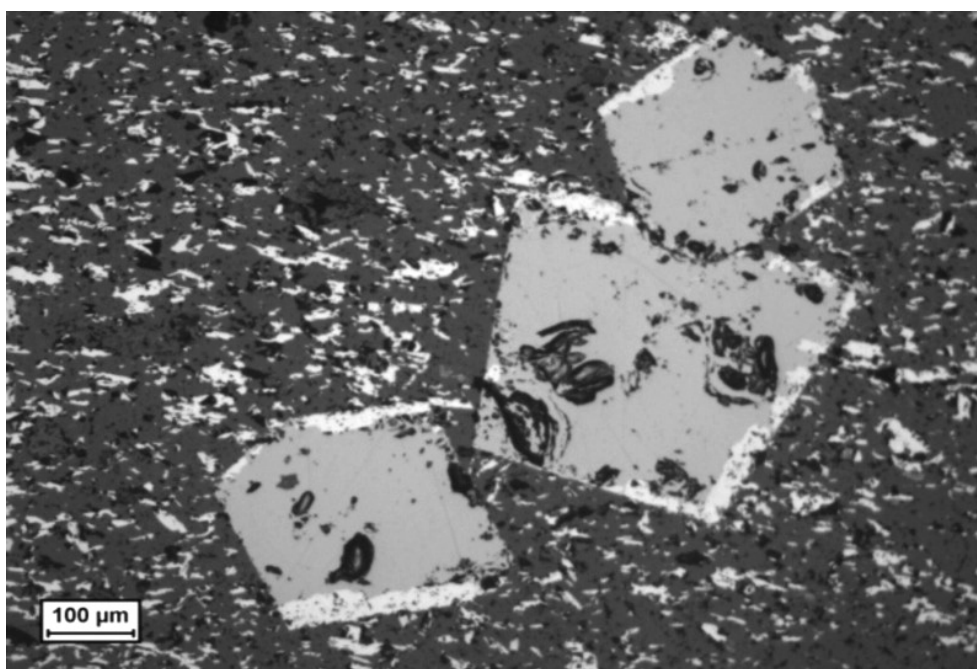


Рис. 1. Вкрапленная руда, крупные вкрапленники магнетита панидиоморфной формы (серое), гематитизированные по периферии и мелкая вкрапленность гематита (белое), полированный шлиф, николи параллельны

Химический состав руды приведен в таблице 1. Среднее содержание железа в руде составляет 56,9 %. Сосредоточено оно в магнетите, гематите, гетите и пирите. С магнетитом, возможно гематитом, связан титан. Не исключено, что с минералами железа связан и ванадий, собственной минеральной фазы которого не обнаружено. Главным порообразующим компонентом явля-

ется оксид кремния (15,9 %). Порообразующие компоненты входят в состав полевых шпатов и слюды, а кремнезем присутствует в виде самостоятельной минеральной формы – кварца. С кальцитом, встречающимся в незначительном количестве, связаны оксид кальция и двуокись углерода. Сера входит в состав пирита. Минеральной формой фосфора является апатит.

Таблица 1. Химический состав руды технологической пробы

Компоненты	Содержание, %
Na <sub>2</sub> O	0,11
MgO	0,68
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,13
SiO <sub>2</sub>	15,9
K <sub>2</sub> O	0,28
CaO	1,72
TiO <sub>2</sub>	0,18
MnO	0,48
Fe <sub>2</sub> O <sub>3,общ</sub>	78,18
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,22
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,75
S <sub>общ</sub>	0,12
CO <sub>2</sub>	0,23

По минеральному составу руда относится к кварц-гематит – магнетитовому типу. Главными рудными минералами являются магнетит и гематит, в подчиненном количестве присутствуют гетит и пирит. Породообразующие минералы представлены кварцем, полевыми шпатами, кальцитом и апатитом. В весьма незначительном количестве в руде обнаружены титаномagnetит, биотит, ортит, пироксен и слоистые алюмосиликаты.

Таблица 2. Минеральный состав руды технологической пробы

Минерал	Содержание, %
Магнетит	53
Гематит	25
Гетит	2
Пирит	1
Кварц	13
Полевой шпат	2
Кальцит	2
Апатит	2

**Магнетит** – главный рудный и количественно преобладающий в руде минерал, отмечается в виде зерен различной степени идиоморфизма. Крупные зерна магнетита обычно имеют идиоморфную пан- и гипидиоморфную форму (рис. 1). Часто крупные кристаллы магнетита содержат включения порообразующих минералов (кварц, апатит). Магнетит подвергается процессам мартитизации разной интенсивности. Отмечается несколько типов мартитизации. Это образование прерывистых и сплошных гематитовых каемок вокруг зерен магнетита (рис. 1), заливообразные замещения гематитом магнетита и тонкие полосовидные выделения гематита в зернах магнетита, иногда напоминающие решетчатые струк-

туры. Мартитизация магнетита негативно влияет на его магнитные свойства, значение удельной магнитной восприимчивости при этом снижается. На технологические свойства магнетита влияет характер взаимоотношения минерала с порообразующими фазами. Отмечаются тесные срастания магнетита с кварцем, значительное количество кварцевых включений в нем.

Во всех зернах магнетита отмечаются включения порообразующих минералов, в первую очередь, кварца различного размера, захваченных, вероятно, в процессе кристаллизации. Кроме того, по границам зерен минерала развиты вторичные коррозионные структуры (ажурные, каемчатые, петельчатые), сформированные гематитом (рис. 2Б). Содержание железа в магнетите по данным микрорентгеноспектрального анализа варьирует от 71,6 % до 72,4 %. При этом практически чистый магнетит отличается содержанием железа (72,2–72,4 %), близким к теоретическому (72,4 %). Магнетит по составу практически однородный. Структурных примесей минерал не содержит.

**Гематит** представлен несколькими разновидностями и в основном является вторичным минералом, замещающим магнетит. В кварцевой матрице гематит развит в виде лейстовидных и пластинчатых выделений с четко прослеживаемой тенденцией к сегрегации. Характер замещения гематитом магнетита весьма разнообразен и фиксируется, как методами оптической микроскопии, так и методами электронной микроскопии и микрорентгеноспектрального анализа. Вторичный гематит, развивающийся по магнетиту, по данным микрорентгеноспектрального анализа содержит от 69,2 до 69,9 % Fe, что практически соответствует теоретическому содержанию (69,9 %). Редко в минерале фиксируются незначительные (до 0,2 %) содержания марганца.

Наиболее четко характер развития гематита по магнетиту (мартитизация) фиксируется электронно-микроскопическими исследованиями (рис. 3). Панидиоморфные кристаллы магнетита или их сростки по периферии замещаются гематитом пластинчатого, чешуйчатого микростроения. Степень замещения различная: от незначительной (рис. 3 А) до весьма интенсивной (рис. 3 Б), иногда отмечаются практически полные псевдоморфозы гематита по магнетиту. С магнетитом и гематитом в тонком срастании находятся зерна апатита (рис. 4 А, Б) и ториевого монацита (рис. 4 Б).

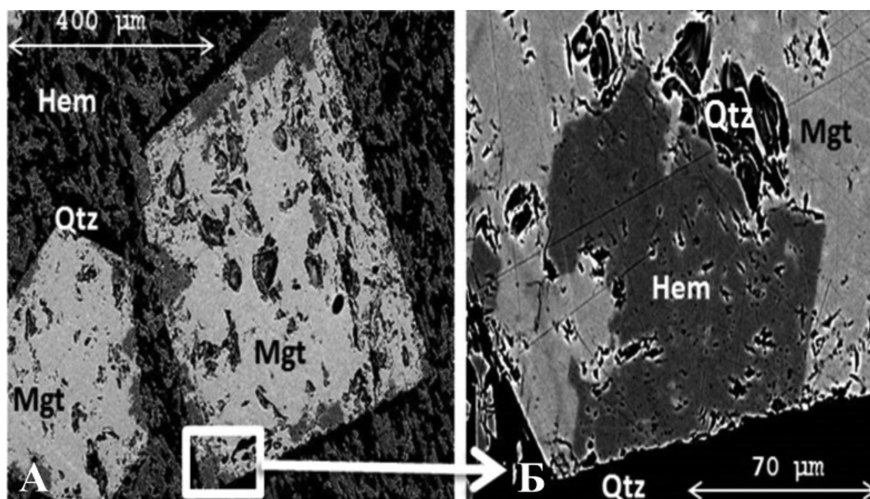


Рис. 2. А – Мартитизированные панидиоморфные зерна магнетита, Б – детализация. Изображение в обратно-рассеянных электронах

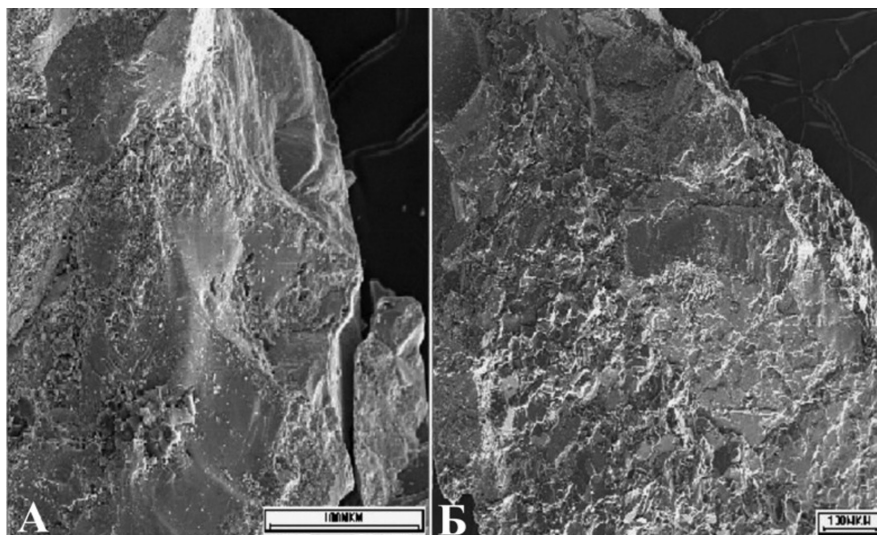


Рис. 3. А – Замещение магнетита гематитом пластинчатого микростроения. Б – Замещение магнетита тонкочешуйчатым гематитом. РЭМ

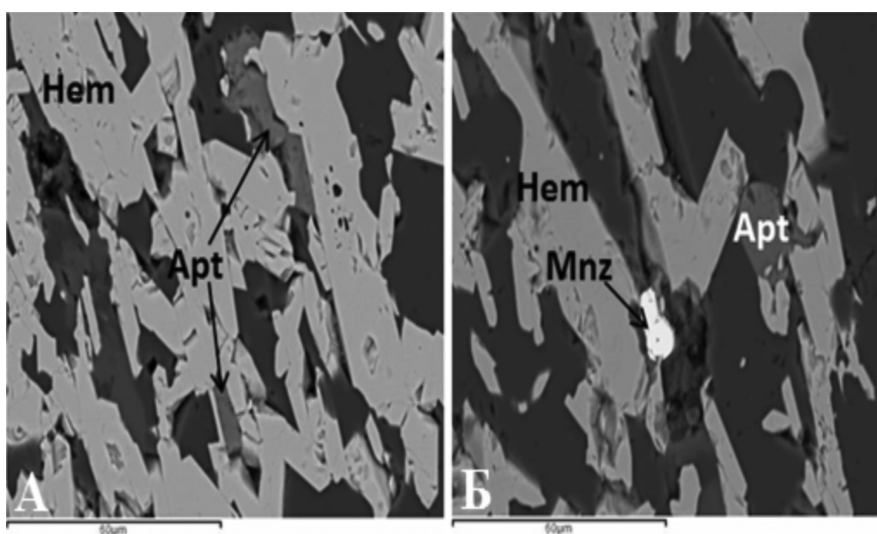


Рис. 4. Тонкие срастания гематита с фосфатами. Изображение в обратно-рассеянных электронах



**Кварц** является главным породообразующим минералом, находится в тесной ассоциации с магнетитом. Нередко слагает матрицу руды, а также встречается в виде разномасштабных гранобластных агрегатов, в которых присутствуют кристаллы магнетита и иногда биотит. Форма зерен кварца в агрегатах самая разнообразная – от неправильной до пластинчатой и шестоватой, практически всегда отмечается мозаичное строение.

**Апатит** представлен зернами и кристаллами разной формы, присутствующими как в кварце, так и магнетите. В кварце, образующим включения заливообразной формы в магнетите, апатит встречается в виде зерен неправильной, таблитчатой, короткостолбчатой, гипидиоморфной формы размер зерен апатита обычно не превышает 0,82 мм.

#### **Заключение**

Минералогические особенности руды, в первую очередь взаимоотношение главных рудообразующих минералов, характер их срастания, предопределяет неполное раскрытие магнетита. Особенностью минерала является и то, что

он накапливается в разных фракциях магнитного анализа. Учитывая то, что магнетит имеет практически стехиометричный состав, следует считать, что его свойства практически полностью зависят от количества включений кварца и степени замещения его гематитом (марттитизация), которые значительно снижают магнитные свойства. Тесные срастания магнетита с кварцем, обладающим большей твердостью, будут влиять на процессы дезинтеграции и раскрытие минерала. Электронно-микроскопическими исследованиями также установлены «обрастания» зерен магнетита кварцем, представленным агрегатом гребенчатого, пластинчатого микростроения, и ассоциирующим с тонкочешуйчатыми слоистыми силикатами. Между зернами магнетита присутствует кристаллически-зернистый кварц и иногда гематит. Подобное взаимоотношение минералов не способствует полному раскрытию магнетита, как показывает опыт, снижает значения плотности и удельной магнитной восприимчивости.

## **ОСОБЕННОСТИ НЕОДНОРОДНОСТИ ТИТАНОМАГНЕТИТОВ МАГМАТОГЕННЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ РУД, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ИХ ОБОГАТИМОСТЬ**

*Быстров И. Г., Пирогов Б. И.*

*ФГУП «ВИМС им. Н. М. Федоровского», г. Москва*

Значение титаномagnetитовых руд в структуре общих подтвержденных запасов железа, титана и ванадия чрезвычайно велико, в РФ и в мире (без РФ): железные руды (Fe), соответственно – 13,5 % и 6,5 %,  $TiO_2$  – 48 % и 60 %,  $V_2O_5$  – 92 % и 90 % [5]. Важными попутными компонентами руд отдельных месторождений являются золото, металлы платиновой группы, медь, никель, цинк, и др. Несмотря на это, на территории РФ сегодня разрабатываются только Гусевогорское, Первоуральское, Волковское и Куранахское месторождения, хотя комплексное изучение титаносодержащих железных руд ведется с 1928 года [4].

Столь низкое промышленное освоение настоящего типа руд связано со сложностью и уникальностью каждого месторождения. Несмотря на пространственную и генетическую связь магматогенных титаномagnetитовых месторождений с производными базитовой магмы [5], приурочены они могут быть к различным породам от

пироксенитов и перидотитов до анортитов, влияние же системы минерал-среда на минералогические особенности (МТО) руд чрезвычайно велико.

Сложность состава и строения минеральных агрегатов, выделяющихся при кристаллизации, требует комплексного минералогического изучения этих руд. Однако спектр методов, позволяющих получить необходимую для оценки минералогическо-технологических особенностей титаномagnetитов информацию, ограничен [6]). Это связано, в первую очередь, с характерным для системы  $FeO-Fe_2O_3-TiO_2$  распадом твердых растворов (РТР), продукты которого представлены тонкими выделениями минералов изоморфных рядов группы шпинелей и ильменита, порой практически неразличимых методами оптической микроскопии (ОМ). Кроме того, диагностические линии минералов группы шпинелей недостаточно хорошо разрешимы на дифрактограммах. Вместе с тем, необходимо учитывать



влияние захваченных в процессе кристаллизации минералов матрицы, чаще всего алюмосиликатов, и продуктов эволюции шпинелей в результате наложенных процессов лейкоксенизации, магмитизации, титанитизации.

В настоящее время в качестве первоочередных к освоению рассматриваются титаномагнетито-

вые месторождения – Собственно–Качканарское, Чинейское и Пудожгорское. По содержанию Ti данные месторождения отвечают, соответственно, низко-, средне- и высокотитанистому типам.

Краткие обобщающие сведения о геологоструктурной позиции месторождений и их сравнение приведены в табл. 1.

Таблица 1. Геологические особенности месторождений титаномагнетитовых руд

Месторождение	Собственно-Качканарское	Чинейское (участок Магнитный)	Пудожгорское
Особенности проявления рудных тел	Приурочено к		
	пироксенитовому пологопадающему (В-СВ – 20–50°) массиву. Размер массива по простиранию – 5,5 км, средняя ширина – 3,3 км. Рудные минералы размещены в виде вкрапленности, реже образуют шлирово-полосчатые скопления. Мощность оруденения более 600 м	габброидному массиву. Рудные минералы связаны с пологопадающими (В – 2–40°), кулисообразно залегающими плитообразными залежами мощностью от 4,6 м до 35,6 м при преобладающей мощности от 15 до 20 м	дифференцированному пологопадающему (ЮЗ – 10–15°) пластовому интрузиву кварцевых долеритов мощностью около 120 м. Титаномагнетит, занимая около 20 % мощности интрузива, образует вкрапленные структуры
Возраст интрузива	нижнепалеозойский	палеопротерозойский	палеопротерозойский
Содержание основных компонентов, %	Февал – 16,55; V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> – 0,14; TiO <sub>2</sub> – 1,30	Февал – 33,5; V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> – 0,55; TiO <sub>2</sub> – 6,50	Февал – 28,7; V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> – 0,43; TiO <sub>2</sub> – 8,10
Сопутствующие ценные элементы	Ni, Co, Sc, Au, Pt, Pd	Co, Pt, Pd, Au, Ag	Cu, Pt, Pd, Au
Запасы Fe (А+В+С1), тыс. т	3. 602. 581	464. 112	316. 689

#### МТО рассматриваемых руд с использованием прецизионных методов исследования

Изучение руд месторождений методами минералогического анализа показало, что наиболее тонко- и мелкозернистые выделения титаномагнетитов (ср. 0,163–0,284), образующие сидеронитовые агрегаты с пироксенитами ( $\approx 70\%$ ) и оливинитами, характерны для весьма бедных руд Собственно Качканарского типа (Fe $\approx 18\%$ ) при самом низком соотношении TiO<sub>2</sub> и Fe (0,078). В рудах Чинейского месторождения, связанных с габброидами, выделения минерала в основном среднезернистые с равномерным распределением (ср. 0,325–0,412 мм) при среднем соотношении TiO<sub>2</sub> и Fe (0,186). И наконец, в Пудожгорских рудах, связанных с кварцевыми долеритами, выделения титаномагнетитов мелко-средне-крупновкрапленные (ср. 0,522–0,531 мм) при самом высоком соотношении TiO<sub>2</sub> и Fe (0,282).

Оценить степень неоднородности (в т. ч. технологической) титаномагнетитов различных руд позволяют методы минералогического анализа: микрорентгеноспектральный (МРСА) и ядерной гамма-резонансной спектроскопии (ЯГРС).

Достоинством метода МРСА является возможность проведения экспрессного локального неразрушающего анализа с определением основных элементов, входящих в состав минералов образца (в том числе и малых содержаний) с высокой точностью (до 0,01 %). Однако при изучении титаномагнетита чрезвычайно важна возможность проведения не только точечного, но и корректного площадного микрозондового анализа. В работе [7] показано, что для учета реального состава титаномагнетита в связи с оценкой обогатимости руд, необходимо проводить исследования и оценку неоднородности минерала не только в точке, но и в пределах площади индивидов. Это позволит предсказать эффективность раскрытия минералов в различной крупности измельчения и последующей магнитной сепарации. Так, усредненный элементный состав магнетитов рассматриваемых месторождений, определенный методом МРСА довольно близок и не отвечает стехиометричному магнетиту (табл. 2). При этом важно отметить не только увеличение в ряду низко-, средне- высокотитанистый тип содержания титана, но и уменьшение содержания Mg и Al, отражающих присутствие малотитанистых шпинелей, в первую очередь плеонаста.

Таблица 2. Средний состав магнетитов месторождений. МРСА, анализ в точке

Месторождение	Mg	Al	Si	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe
Собственно-Качканарское	0,89	1,12	0,10	0,02	1,51	0,35	0,06	0,26	69,90
Чинейское	0,40	0,31	0,10	0,04	1,87	0,65	0,04	0,35	68,52
Пудожгорское	0,03	0,11	0,09	0,04	2,54	0,89	0,05	0,06	67,16

При этом титаномагнетит характеризуется совершенно иным элементным составом, что наглядно демонстрируется на рис. 1 и в табл. 3 на примере титаномагнетита подрудного горизонта Пудожгорского месторождения.

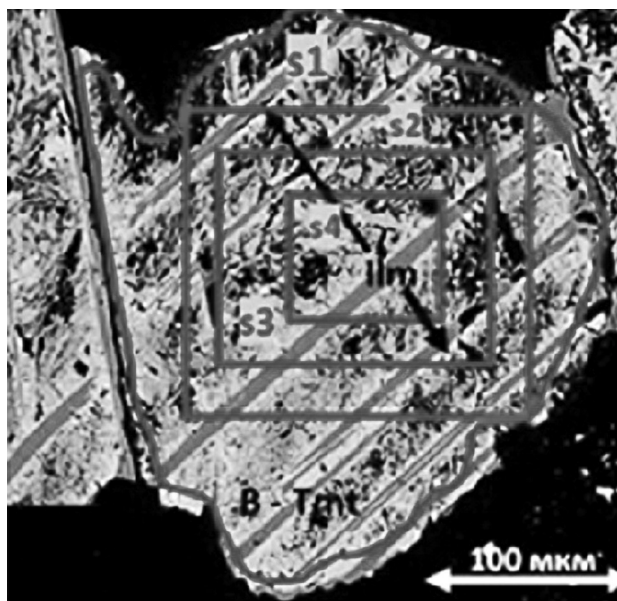


Рис. 1. Морфоструктурные особенности отдельных зерен титаномагнетитов рудного горизонта, отражающие принцип подхода к технологической оценке их качества по данным МРСА

Таблица 3. Содержание основных элементов для выделенных на рис. 1 участков

Вид анализа	Fe, %	TiO <sub>2</sub> , %	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , %
Точка	62,24	8,52	1,71
s4(50μm)	60,20	15,81	1,67
s3(100μm)	58,44	20,07	1,53
s2(200μm)	58,42	20,12	1,50
s1(300μm)	57,86	20,94	1,12

Рис. 1 отражает описанную П. Рамдором [8] многостадийность распада и преобразования исходного титаномагнетита в пространственно-временных рамках с постепенным «самоочищением» его через стадии образования зонального – секторального – блокового строения и переход в агрегат выделившихся из него фаз минералов, сначала микро, а в последствие и макро.

Наглядное отображение существенных различий в титаномагнетитах, как объектах технологической минералогии удастся проследить, если вынести нормированные содержания основных компонентов, полученные растровой съемкой методом МРСА, на тройную диаграмму (рис. 2).

Рисунок 2 определенно показывает влияние условий кристаллизации на распределение продуктов РТР и, соответственно, МТО руд. Приуроченные к пироксенитовому массиву титаномагнетитовые руды Собственно-Качканарского месторождения характеризуются низкой титанистостью и практически полным отсутствием не выделившихся титаносодержащих минералов. Руды Пудожгорского месторождения, приуроченные к пластовому интрузиву кварцевых долеритов, напротив, высокотитанисты в обоих технологических горизонтах. В них четко прослеживается влияние нераскристаллизовавшихся в крупные агрегаты ильменита для подрудного горизонта и ульвешпинели для рудного. Титаномагнетиты участка Магнитный Чинейского месторождения, связанного с габброидным массивом, занимают промежуточное положение.

Как показывают данные микрорентгеноспектральных исследований, титаномагнетит отличается крайней неоднородностью. Чтобы понять, какое количество Ti изоморфно входит в структуру магнетита, а какое связано с включениями других титаносодержащих минералов, было проведено изучение образцов методами мессбауэровской спектроскопии. ЯГР-спектроскопия позволяет фиксировать и различать случаи нестехиометричности состава и изоморфизма в магнетитах с заменой ионов Fe<sup>2+</sup> и Fe<sup>3+</sup> изовалентными ионами других элементов, а также количество оценивать дефектность структуры и содержание изоморфных примесей. Основным измеряемым параметром являлось соотношение площадей от ионов Fe<sup>3+</sup> тетраэдрических позиций (А) в структуре магнетита и октаэдрических (В) от ионов Fe<sup>3+</sup> и Fe<sup>2+</sup> (SA/SB), теоретическое ≈ 0,5. Температура Кюри чистого магнетита – 585 °С. Результаты исследований приведены в табл. 4.

Таблица 4. Сопоставление данных образцов магнетита по мессбауэровской спектроскопии и температуре Кюри

Месторождение	Собственно-Качканарское		Чинейское		Пудожгорское	
S <sub>A</sub> /S <sub>B</sub>	0,53	0,54	0,56	0,52	0,56	0,57
T <sub>c</sub> , °С	556,1	556,4	565	568	555	557

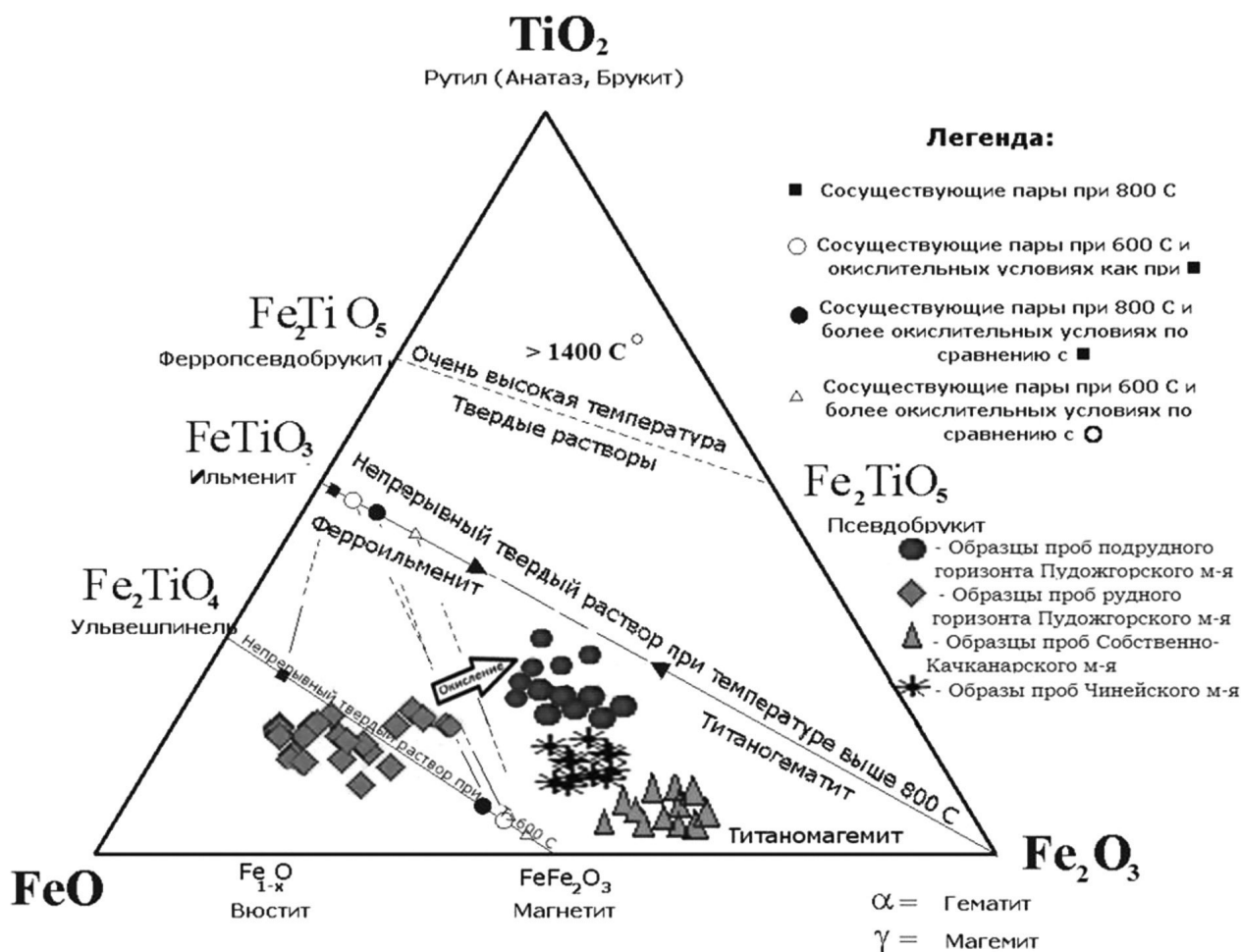


Рис. 2. Распределение нормированных составов титаномагнетитов на диаграмме Фроста [10], с дополнениями авторов

Сопоставление данных мессбауэровской спектроскопии и термического анализа с результатами МРСА, позволяет сделать вывод о том, что содержание титана в монофракциях минералов не превышает 1–2,0 %. Основная же часть титана связана с мелковкрапленным ильменитом и ульвешпинелью, определяющими МТО рассматриваемых руд.

Как видно из приведенных данных, к каждому месторождению титаномагнетитов и даже отдельному его горизонту необходим свой технологический подход, целью которого, естественно, должно являться максимальное извлечение полезных ископаемых при минимальных затратах и экологических нагрузках. Это и является одной из основных проблем, затрудняющих повсеместное вовлечение титаномагнетитовых руд в промышленное освоение. Весьма значимо прослеживается изменчивость состава и внутреннего строения в анатомии выделений титаномагнетитов соответственно в ряду низко-, средне и высокотитанистых руд за счет различной при-

роды магматического этапа минералообразования и более поздних метасоматических изменений. В низкотитанистых рудах титаномагнетиты характеризуются весьма тонкими проявлениями продуктов РТР зонального и секториального, частично блокового строения в анатомии зерен. Рудный минерал в среднетитанистых рудах уже отличается проявлением более четкого зонального, блокового и скелетного строения. В высокотитанистых рудах анатомия его зерен преобразуется весьма существенно в связи с формированием сложных блоковых и скелетных структур при существенной роли нерудных включений. Резко усложняется анатомия зерен за счет интенсивного влияния наложенных процессов на фоне микротектонических преобразований;

Немаловажное значение имеют и типоморфные особенности сосуществующего с титаномагнетитом ильменита [1]. Выделяемые даже в пределах одного месторождения морфоструктурные типы ильменита имеют различный состав (рис. 3, табл. 5).



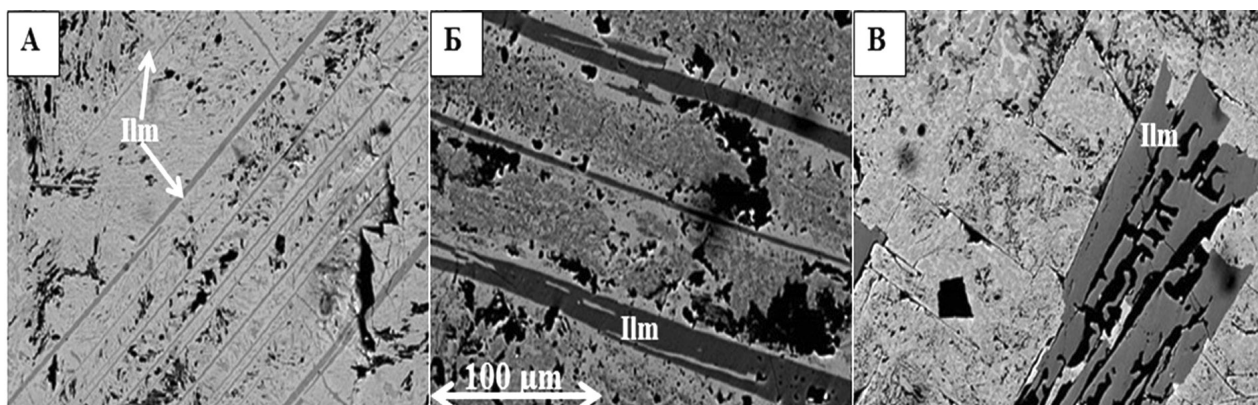


Рис. 3. Морфоструктурные особенности выделений ильменита в титаномagnetите, РСМА (Пудожгорское месторождение)

Таблица 5. Средний элементный состав ильменита различных морфологических форм Пудожгорского месторождения

Форма выделения	Рисунок	Элемент, %						
		Mg	Al	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe
Ламели	А	0,0	0,1	0,0	33,2	0,0	0,9	31,6
Пластины	А–Б	0,0	0,0	0,0	30,3	0,0	1,1	36,6
Блоки	В	0,1	0,1	0,0	26,7	0,0	1,0	40,4
Теоретический состав		0,0	0,0	0,0	31,6	0,0	0,0	36,8

Как показывают данные таблицы 5, увеличение размера ильменита приводит к понижению в нем содержания титана и повышению содержания железа по сравнению с теоретическим составом.

Рассматриваемые на рис. 3 взаимоотношения титаномagnetита и ильменита прослеживаются и в рудах Собственно-Качканарского и Чинейского месторождений. Некоторые из них отображены на рис. 4.

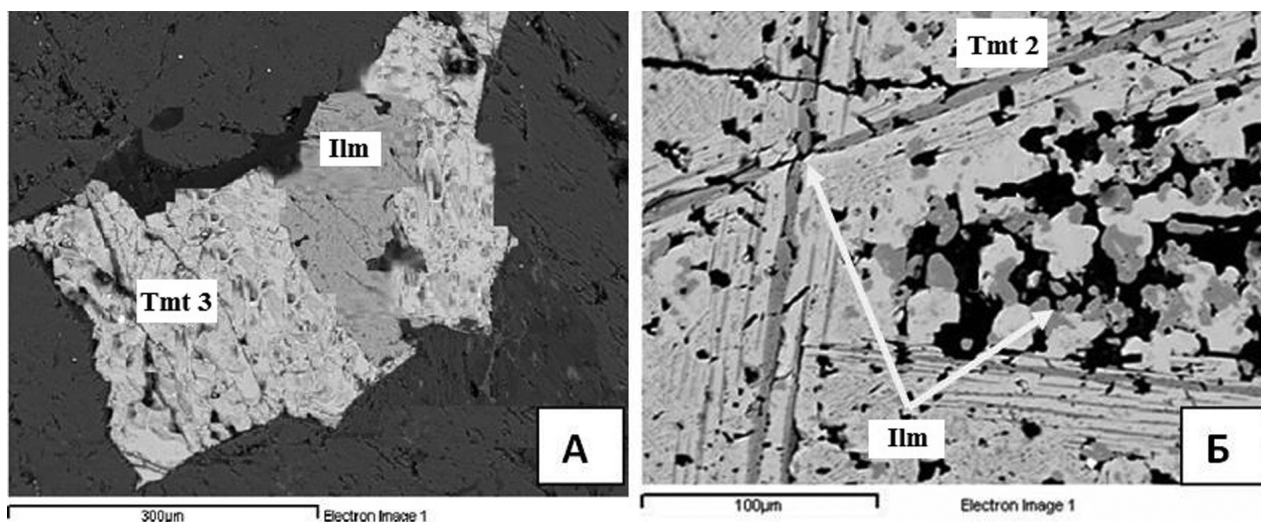


Рис. 4. Сложное строение агрегатов титаномagnetита, МРСА: А – блоки ильменита в образцах руд Собственно-Качканарского месторождения, Б – пластины и ламели ильменита в образцах руд Чинейского месторождения

Важно отметить, что даже в рудах с низким содержанием ильменита (1–3 %), данный минерал нередко образует крупные (до 5 мм) блоки и может быть выделен в самостоятельный концентрат путем их обогащения по

гравитационно-магнитной схеме. В то же время, в более богатых ильменитом рудах, как показывают исследования, он может быть относительно равномерно распределен в магнетитовой матрице и получение как железного,



так и титанового промпродукта затруднительно даже с использованием технологии электроплавки.

Кроме того, выделения ильменита, представленные одним морфологическим типом, но разных месторождений имеют разный элементный состав, что, согласно, работам [2, 9] является функцией времени и термодинамических усло-

вий образования. При этом выявленная нами для ильменитов Пудожгорского месторождения тенденция повышения содержания железа при укрупнении выделений минерала сохраняется и для руд других месторождений. Особенности изменения химического состава ильменита выделенных форм рассматриваемых месторождений отображены на рис. 5 и в табл. 6.

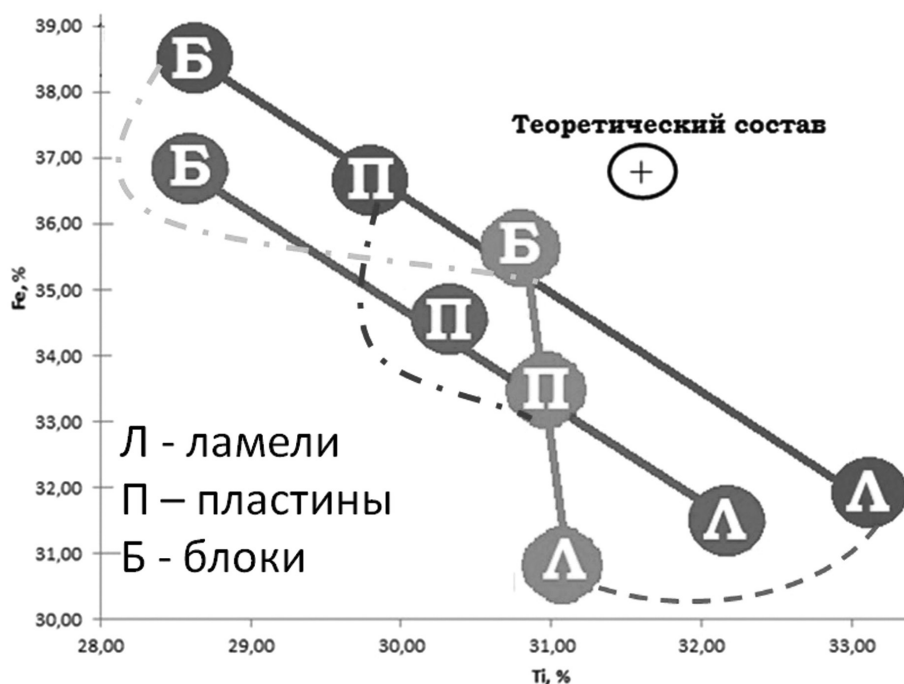


Рис. 5. Влияние морфологии выделений ильменита на содержание в них железа, титана и элементов примесей, по данным МРСА

Таблица 6. Количественное выражение рис. 5

Месторождение	Форма выделения	Элемент, %							КТi*
		Mg	Al	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe	
Собственно – Качканарское	Ламели	1,2	0,0	0,0	31,2	0,0	2,6	31,2	166,8
	Пластины	0,7	0,0	0,0	31,1	0,7	3,6	33,5	154,9
	Блоки	0,2	0,0	0,0	30,7	0,0	4,5	35,8	143,0
Чинейское	Ламели	0,2	0,0	0,0	32,2	0,0	0,2	31,7	169,4
	Пластины	0,8	0,0	0,0	30,3	0,0	0,5	34,5	146,5
	Блоки	1,5	0,0	0,0	28,5	0,0	1,0	36,6	129,9
Пудожгорское	Ламели	0,0	0,1	0,0	33,2	0,0	0,9	31,6	175,3
	Пластины	0,0	0,0	0,0	30,3	0,0	1,1	36,6	138,1
	Блоки	0,1	0,1	0,0	26,7	0,0	1,0	40,4	110,2
Теоретический состав		0,0	0,0	0,0	31,6	0,0	0,0	36,8	143,2

\* – коэффициент титанистости ( $kTi$ ) =  $[(TiO_2/Fe) \cdot 102]$

Термодинамические параметры, влияющие на элементный состав ильменитов, выражаются в наличие в минерале изоморфных железу примесей магния и марганца, причем наиболее четко это влияние из-за отсутствия взаимодействия с нерудной составляющей руд прослеживается в типе ламель. Элементный состав более круп-

ных выделений титаномагнетита нередко изменен наложенными процессами аутометасоматоза. Так, для наиболее высокотемпературных (1000–1300 °С) ламель ильменита, приуроченных к Собственно-Качканарскому месторождению характерно наименьшее (в среднем 31 %) содержание железа, что обусловлено вхождением

ем в состав минерала марганца (до 4,5 %) и магния (до 1,0 %). Низкотемпературные (600–900°C) ламели ильменита руд Пудожгорского месторождения, напротив, по элементному составу наиболее богаты железом и титаном и практически не содержат примесных элементов (Mg+Mn не более 1,5 %). Среднетемпературные (800–1100°C) ламели ильменита Чинейского месторождения занимают промежуточное положение по содержанию как железа и титана, так и элементов примесей. Укрупнение морфологических разностей ильме-

нита приводит к увеличению в них содержания железа. Это объясняется развитием в блоковых, реже пластинчатых формах процесса лейкоксенизации, с образованием псевдобрукита ( $\text{Fe}_2\text{TiO}_5$ ), а также шпинелей типа плеонаста (рис. 6). Типоморфные признаки ильменита, затрагивающие химический состав, а также лейкоксенизация и титанитизация последнего, согласно данным [3], существенно влияют на его физические свойства и, соответственно, минералого-технологические особенности ильменита и руд в целом.

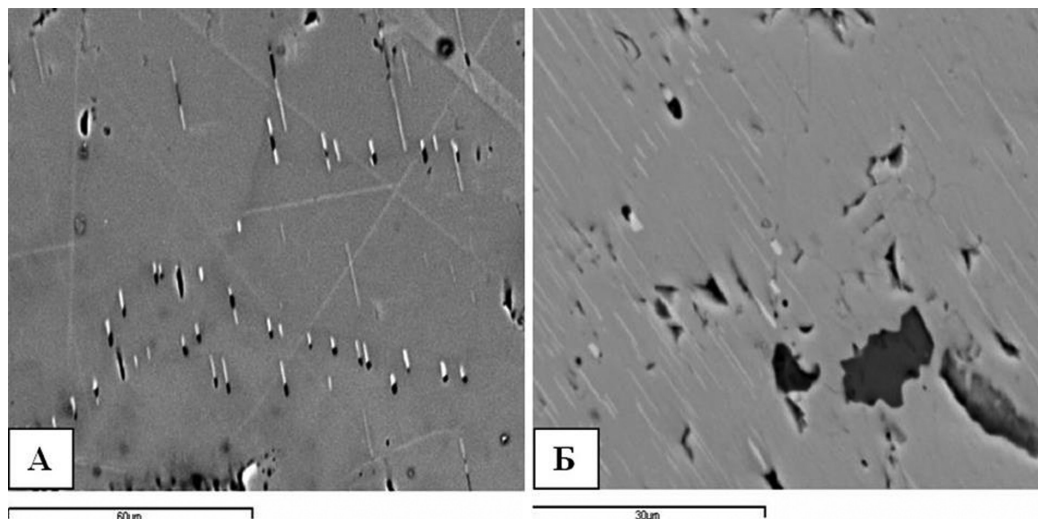


Рис. 6. Выделения псевдобрукита (белое) и шпинели (черное) в ильмените, МРСА.

А – Чинейское месторождение, Б – Пудожгорское месторождение

Оценивая типоморфные признаки титаномагнетита и их влияние на проведение технологических работ, стоит подчеркнуть следующее:

Магнетиты магматических месторождений всегда микронеоднородны и представляют гетерогенные многофазные образования. Широкое развитие процессов распада твердого раствора в титаномагнетитовых рудах обуславливает необходимость изучения не только типоморфных признаков главного рудного минерала, но и сопутствующих, в первую очередь ильменита.

В отличие от других комплексных руд, валовый элементный состав титаномагнетитов, хотя и позволяет разделить их по содержанию Ti на высоко-, средне- и низкотитанистые, не дает практиче-

ской технологической информации. В рудах, отнесенных по общему содержанию Ti к одному типу, этот элемент может служить как вредным, неизвлекаемым компонентом, так и ценнейшим альтернативным источником минерального сырья.

Различия в содержании и составе элементов-примесей в титаномагнетите и ильмените определяют их физические (плотность, микротвердость, удельную намагниченность и др.) и, соответственно, технологические свойства.

Таким образом, при обогащении железных руд магматического генезиса необходимо оценивать степень неоднородности титаномагнетита и выделять его разновидности при геолого-технологическом картировании.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гаранин В. К., Кудрявцева Г. П., Сошкина Л. Т. Ильменит из кимберлитов. М.: МГУ, 1984, 240 с.
2. Евдокимов А. Н., Багдасаров Э. А. Микрокристаллический ильменит связующей массы кимберлитов Куонамского района (Якутия). Зап. ВМО, 1982, т. 3, вып. 5. С. 570–581.

3. Игнатьев В. Д. Кристаллохимические факторы устойчивости оксидов и силикатов к выветриванию. Екатеринбург: УрО РАН, 2005.

4. Малышев И. И. Закономерности образования и размещения титановых руд. М.: Госгеолтехиздат, 1957. 276 с.

5. Пахомов Ф. П., Тигунов Л. П., Быховский Л. З. Титаномагнетитовые месторождения России: минерально-сырьевая база, перспективы освоения и комплексного использования/ «Минеральное сырье». Серия геолого-экономическая, № 30. М.: «ВИМС», 2010, 138 с.

6. Пирогов Б. И. Поротов Г. С., Холошин И. В., Тарасенко В. Н. Технологическая минералогия железных руд. Ленинград: Наука, 1988. 304 с.

7. Пирогов Б. И., Броницкая Е. С., Астахова Ю. М., Волков Е. С. Особенности вещественного состава титаномагнетитовых руд магматического генезиса, определяющие их обогатимость. // Разведка и охрана недр. 2013. № 2. С. 57–61.

8. Рамдор П. Рудные минералы и их сростания / Под ред. А. Г. Бетехтина, пер. с англ. М. Изд-во иностр. лит-ры, 1962. 1132 с.

9. Юшко С. А. Методы лабораторного исследования руд: учеб. 5-е изд. М.: Недра, 1984. 389 с.

## МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ТИТАНОМАГНЕТИТОВЫХ РУД ЧИНЕЙСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ИХ ОБОГАТИМОСТЬ

*Иванова М. В., Пирогов Б. И., Броницкая Е. С.*

*ФГУП «ВИМС им. Н. М. Федоровского», г. Москва*

Непрерывно растущий спрос на традиционные и новые виды минерального сырья в условиях повсеместного истощения запасов богатых железных руд, а также возрастающие требования к качеству конечных продуктов обогащения, ставят перед исследователями задачи освоения и комплексного использования труднообогатимых руд, таких как титаномагнетитовые руды, характеризующиеся тонким взаимопроращением, сложностью минерального состава и наличием нескольких минералов, содержащих титан, что обуславливает их близкие технологические свойства. В будущем титаномагнетитовые руды могут стать основным источником сырья для качественной металлургии, производства ферросплавов, пигментного диоксида титана, а также некоторых рассеянных элементов, цветных и благородных металлов.

Россия, наряду с Канадой, ЮАР, КНР и другими странами, обладает огромными запасами титаномагнетитовых ванадийсодержащих руд – около 50 % мировых запасов. На территории России выявлено и в различной степени оценено более 40 месторождений титаномагнетитов в ассоциации с ильменитом, магнетитом, гематитом, перовскитом, сфеном, рутилом, кульсонитом и другими минералами [3].

Месторождения титаномагнетитовых руд расположены на Урале (Гусевогорское, Собственно Качканарское, Суроямское) и в Сибири (Чинейское, Михайловское, Хилокское и Слюдянское). Главные минералы этих руд – титаномагнетит, ильменит, реже перовскит и

собственно магнетит. Соотношение главных рудообразующих минералов меняется от собственно титаномагнетитовых с ильменитом до существенно ильменитовых с магнетитом и титаномагнетитом. Руды низкотитанистые титаномагнетитовые традиционно обогащаются методом мокрой магнитной сепарации, обеспечивающей получение высококачественных по содержанию железа концентратов. Необходимо отметить, что титаномагнетитовые концентраты, содержащие 0,3–1,2 %  $V_2O_5$ , во всем мире являются основным источником получения ванадиевой продукции. Титаномагнетитовые руды, содержащие свободный ильменит, подвергаются обогащению по гравитационно-магнитно-электрической схеме с получением двух концентратов: ильменитового с содержанием  $TiO_2 > 42\%$ , имеющего самостоятельную промышленную ценность, и титаномагнетитового ванадийсодержащего, характерной особенностью которого является высокое содержание титана – до 8–15 %  $TiO_2$  – и сравнительно низкое содержание  $V_2O_5$  – 0,6–1,0 % [1].

Чинейский рудный комплекс является одним из самых крупных в России по запасам железа, а по запасам ванадия не имеет себе равных в мире и его можно назвать уникальным. Титаномагнетитовые руды месторождения (участок «Магнитный») характеризуются разнообразием текстур и структур, минерального и химического составов, что обусловлено структурно-тектонической позицией, составом и строением вмещающих оруденение горных пород.

Главный рудный минерал – титаномагнетит представляет собой агрегат микрофаз – ульвошпинели, ильменита, плеонаста, герцинита, собственно титаномагнетита и чистого магнетита, имеет сложную генетическую природу, что выразилось в особенностях неоднородности состава и анатомии зерен минерала [2].

Объектом минералогических и технологических исследований являлись две пробы титаномагнетитовой руды Чинейского месторождения (участок «Магнитный»):

– проба Т-20, характеризующая рядовые руды рудных тел, выделенных в серии железистых габброидов, и содержащая  $Fe_{\text{общ}} - 20,7 \%$ ;

– проба Т-21, характеризующая богатые руды линзовидной залежи, выделяющейся в средней части железистой серии расслоенных габброидов, содержащая  $Fe_{\text{общ}} - 46,0 \%$ ;

Выявлены существенные различия по текстурно-структурным особенностям и минеральному составу рядовых (проба Т-20) и богатых (проба Т-21) руд. Минеральный состав руд по пробам приведен в табл. 1, а химический состав руд приведен в табл. 2.

Анализ данных табл. 1 и 2 с учетом дополнительных минералого-петрографических исследований позволил установить следующее: в пробе Т-21 по сравнению с пробой Т-20 более чем на два порядка выше содержание рудных минералов. Относительное содержание ильменита по отношению к главному минералу составляет соответственно 0,11 (пр. Т-20) и 0,02 (пр. Т-21). Учитывая гранулярный состав, особенности проявления и сложный характер взаимоотношений ильменита и титаномагнетита, возможно получение ильменитового концентрата при его очень небольшом выходе.

Таблица 1. Минеральный состав руд технологических проб

Минералы	Массовая доля, %	
	Проба Т-20	Проба Т-21
Рудные минералы:	25,5	66,5
«Титаномагнетит» и собственно магнетит	23,0	65,0
Ильменит	2,5	1,5
Нерудные минералы:	74,5	33,5
Бiotит	3,7	2,0
Пироксен (орто- и клинопироксены), в том числе амфиболизированные	18,5	6,7
Эпидот	3,5	5,0
Хлорит + серпентин	13,8	12,5
Плагноклазы	35	6,8
Апатит	0,04	0,02
Прочие (кварц, шпинель, сульфиды, кальцит, бадделеит и др.)	1,5	0,5

Однако, неоднородность внутреннего строения зерен титаномагнетита, связанная с образованием при измельчении тонких рудных частиц различной морфологии (размер 40–20 мкм), предопределяет формирование флокул при процессах магнитной сепарации и накопление их в мелких классах (с большим количеством тонких и крупных частиц нерудных минералов), что в конечном итоге приведет к разубоживанию концентрата.

Минералогические исследования показали, что титаномагнетит следует рассматривать не как отдельный минерал (возможен изоморфизм Ti в структуре магнетита только до 1,5 %), а как сложный агрегат с учетом включений ильменита и шпинелей различного состава.

В связи с этим для оценки степени неоднородности минерала, определения в нем содержаний основных элементов (для получения сведений о реальном составе титаномагнетита) была использована разработанная ранее Пироговым Б. И. специальная методика определения двух коэффициентов: титанистости –  $K_{Ti} = TiO_2/Fe = 0, n. . = n \cdot 10^{-2}$  и ванадистости –  $K_{V} = V_2O_5/Fe = 0, n. . = n \cdot 10^{-2}$  [4]. Использование коэффициентов позволяет дать оценку эффективности проводимых операций по извлечению ильменита (электросепарация, флотация, гравитация) в связи с его переизмельчением как более хрупкого минерала и проявлением продуктов лейкоксенизации.



Таблица 2. Химический состав руд технологических проб

Компоненты	Содержание, масс. доля, %	
	Проба Т-20	Проба Т-21
Fe <sub>общ</sub>	20,7	46,0
FeO	9,34	21,1
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19,3	42,2
TiO <sub>2</sub>	4,01	9,10
V	0,20	0,44
SiO <sub>2</sub>	35,6	10,4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,4	6,66
MgO	4,34	3,20
Na <sub>2</sub> O	2,09	0,42
S <sub>общ</sub>	0,20	0,43
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,017	0,008
CaO	9,46	2,62
K <sub>2</sub> O	0,38	0,11
MnO	0,18	0,22
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,035	0,074
Cu	0,082	0,14
Zn	0,013	0,030
Co	0,012	0,023
Ni	0,016	0,033
Pb	<0,02	<0,02

Примечание. Анализы выполнены и рассчитаны по разным методикам.

Существенная разница в степени неоднородности рудных минералов (средние значения  $K_{Ti}$  титаномагнетитов основных разностей составляют 18–20, а ильменитов 115–127) позволяет использовать ее для оценки продуктов обогащения. Появление в продуктах обогащения ильменитов будет увеличивать среднее значение коэффициента неоднородности продукта по сравнению с его средней величиной, характерной для титаномагнетита.

Содержание в рудах ильменита (1,5–2,5) может представлять определенный промышленный интерес, но при небольшом его выходе будет выделено и небольшое количество самостоятельно-го ильменитового концентрата.

Для обогащения титаномагнетитовых руд в настоящее время используется способ мокрой магнитной сепарации при исходной крупности от –0,5 мм, вследствие чего в операции рудоподготовки вовлекаются значительные массы вмещающих пород, которые необходимо выводить из процесса на стадии предварительного крупнокускового обогащения.

Одним из перспективных направлений предварительного крупнокускового обогащения является сухая магнитная сепарация.

Исследования технологических свойств руды позволили разработать технологию предвари-

тельного сухого магнитного обогащения, основными положениями которой являются:

- дробление исходной руды до крупности –50 мм без раскрытия совместных сростков титаномагнетита с ильменитом и магнетитом, но с раскрытием их ассоциаций с силикатными минералами;

- сухая магнитная сепарация дробленой руды с получением в немагнитной фракции товарной продукции (щебень+песок), а в магнитной – черного железо-ванадиевого концентрата с последующей его доводкой мокрой магнитной сепарацией после цикла измельчения;

- при сухой магнитной сепарации рядовой руды пробы Т-20 крупностью –50+0 мм получена магнитная фракция с содержанием Fe<sub>общ</sub> – 30,14 %, TiO<sub>2</sub> – 5,72 % и V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 0,55 % при извлечении 86,85; 92,63; 94,54 % соответственно. Немагнитная фракция, содержащая 7,68 % Fe<sub>общ</sub>, 0,81 % TiO<sub>2</sub> и 0,05 % V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, может быть использована в качестве строительного-дорожного материала. Выход ее составил 37,26 % от руды;

- при сухой магнитной сепарации руды крупностью –50+0 мм пробы Т-21, характеризующей богатые руды месторождения, получена магнитная фракция, содержащая 50,7 % Fe<sub>общ</sub>, 10,4 % TiO<sub>2</sub> и 0,92 % V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Выход ее составил 90,1 %. По существу магнитная фракция представляет собой комплексную железо-ванадиевую руду высокого качества с низким содержанием вредных примесей (серы <0,1 и P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 0,047 %). В немагнитной фракции при выходе 9,9 % содержание железа составляет 13 %, потери металла в ней незначительны.

Результаты СМС можно оценить как положительные, т. к. не только выделяются отвалы хвосты высокой крупности перед дорогостоящим измельчением и глубоким обогащением – мокрой магнитной сепарацией, но и стабилизируется качество магнитного продукта, поступающего на глубокое обогащение, которое осуществляется в три стадии. При выборе оптимальных стадийальных значений крупности измельчения были учтены особенности руды, обусловленные тем, что породообразующие минералы (в основном пироксен, плагиоклаз) имеют хорошо выраженную спайность и отдельность, что определяет их легкую разрушаемость в процессе измельчения до размеров природной зернистости. Титаномагнетит, как более мелкий и тонкий, измельчается значительно труднее и поэтому в рудной части крупных классов преобладают сростки (рис. 1).

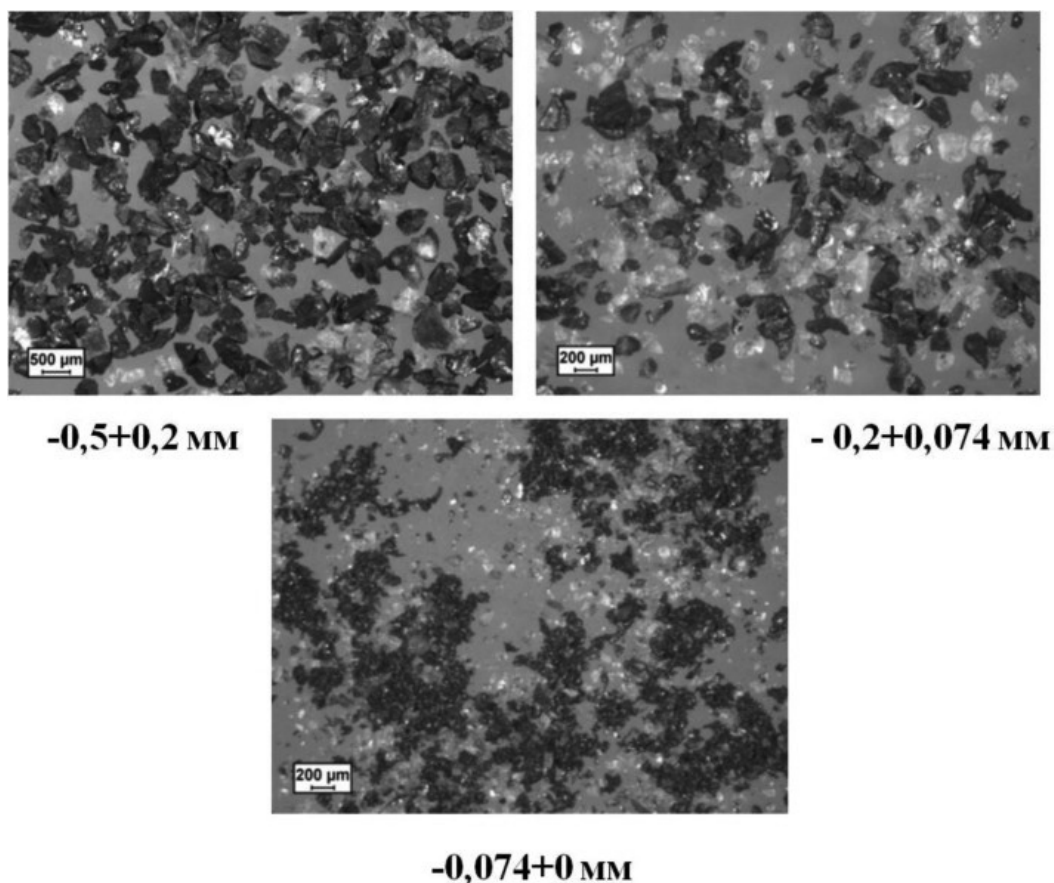


Рис. 1. Распределение сростков рудных и нерудных минералов по классам крупности

По магнитной схеме обогащения (СМС + глубокое обогащение методом мокрой магнитной сепарации) пробы Т-20 был получен титаномагнетитовый концентрат, содержащий 59,0 %  $Fe_{общ}$ , 10,14 %  $TiO_2$  и 1,2 %  $V_2O_5$  при извлечении 70,1; 67,24 и 83,87 % соответственно.

Перспективным направлением предварительного крупнокускового обогащения является также рентгенорадиометрическая сепарация (РРС).

Проведенные исследования по РРС титаномагнетитовой руды Чинейского месторождения позволили не только выделить отвалы, но и разделить руду по минеральному составу – на Ti-Fe-V и Fe-V продукты.

При РРС руды пробы Т-20 был выделен Ti-Fe-V продукт, содержащий 48,14  $Fe_{общ}$ , 10,91  $TiO_2$  и 0,89 %  $V_2O_5$ , при извлечении 9,79; 11,19; 10,66 % соответственно. Выход его составил 4,06 %.

Полученный титан-железо-ванадиевый концентрат удовлетворяет по качеству требованиям ТУ 14-2Р-332-98 к титаномагнетитовому концентрату марки КЖВМ.

Проведенные испытания позволили разработать комбинированную технологическую схему (РРС + глубокое обогащение).

По предложенной схеме получено:

- из руды пробы Т-20 суммарная магнитная фракция, содержащая 58,0 %  $Fe_{общ}$ , 10,04 %  $TiO_2$  и 1,13 %  $V_2O_5$ , с извлечением 66,79; 53,87; 76,95 % соответственно, при выходе – 25,28 %.

- из руды пробы Т-21 суммарная магнитная фракция, содержащая 53,49 %  $Fe_{общ}$ , 11,43 %  $TiO_2$  и 0,99 %  $V_2O_5$ , извлечение составило 88,17; 89,04; 90,15 % соответственно, при выходе 72,34 %. Выход отвалных хвостов (хвосты РРС + немагнитная фракция ММС) – 15,79 % при содержании железа в них – 12,53 %, потери – 4,5 %.

Минералого-технологические исследования ильменитового концентрата, полученного по схеме СМС+ММС показали, что в процессе рудоподготовки для получения титаномагнетитового концентрата необходимо тонкое измельчение руды до крупности – 0,074 мм. Однако, при общем минералогическом изучении взаимоотношений титаномагнетита с ильменитом были выявлены противоречивые характеристики по их сростаниям, морфологии, размерам и свойствам, которые способствуют при таком измельчении разрушению первичных зерен ильменита, обладающих отдельностью, на

тонкие и хрупкие зерна пластинчатой и игольчатой формы в сростаниях с нерудными минералами, которые легко разрушаются и образуют шламуемую фракцию, трудно поддающуюся обогащению. Технологические испытания по возможности выделения ильменитового концентрата с использованием различных методов обогащения по этой схеме не дали положительных результатов.

Следует отметить, что при РРС удается сконцентрировать ильменит в ассоциации с титаномагнетитом в более крупных выделениях, т. е. не подвергать предварительному стадийному дроблению и измельчению в соответствии с его содержанием в минеральном составе исходной руды – 2,5 % (табл. 1).

Объектом для изучения принципиальной возможности получения ильменитового концентрата стал Ti-Fe-V продукт РРС, содержащий 48,14 % Fe<sub>общ</sub>, 10,91 % TiO<sub>2</sub> и 0,89 % V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

В результате гравитационного обогащения, магнитной сепарации в слабом и сильном полях и электрической сепарации получен ильменитовый концентрат, содержащий 48,1 % TiO<sub>2</sub> при извлечении 46,8 % от операции. Таким образом, показана возможность селективного вы-

деления ильменитового концентрата из рядовой руды пробы Т-20, содержащей TiO<sub>2</sub> (4,01 %).

При содержании ильменита в руде (5–10 %) целесообразно включать в схему технологических операций селективное выделение ильменитового концентрата, однако ввиду ее значительного усложнения это решение должно быть подтверждено технико-экономическими расчетами.

Полученный по комбинированной схеме (СМС + глубокое обогащение) титаномагнетитовый концентрат, содержащий TiO<sub>2</sub> – 10,14 % и V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 1,2 % представляет интерес как объект для получения ванадия.

Установлена возможность извлечения ванадия из чинейских титаномагнетитовых концентратов, полученных в ходе предварительного и глубокого обогащения (проба Т-20), гидрометаллургическим методом. Для извлечения ванадия из титаномагнетитовых концентратов можно использовать как содовую технологию, обеспечивающую извлечение в раствор V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 78–79 %, так и известковую технологию, по которой извлечение в раствор V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 60 %.

Технический пентаксид ванадия содержит 98 % основного вещества.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Каменева Е. Е., Скамницкая Л. С. Обогащение минерального сырья Карелии. Петрозаводск: КарНЦ, 2003.
2. Кривовичев В. Т. Минералогический словарь – СПб: С-Петербургский ун-т, 2008.
3. Пахомов Ф. П., Тигунов Л. П., Быховский Л. З. Титаномагнетитовые месторождения России:

минерально-сырьевая база, перспективы освоения и комплексного использования. М.: ВИМС, 2010.

4. Пирогов Б. И., Броницкая Е. С., Астахова Ю. М., Волков Е. С. Особенности вещественного состава титаномагнетитовых руд магматического генезиса, определяющие их обогатимость. «Разведка и охрана недр», № 2, Москва, 2013.

## ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ СЕЛЕКТИВНОЙ КАРБОТЕРМИЧЕСКОЙ ТВЕРДОФАЗНОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ ХРОМОВЫХ РУД САРАНОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

*Ануфриева С. И., Кривоконева Г. К., Сладкова Г. А.*

*ФГУП «ВИМС им. Н. М. Федоровского», г. Москва, anufrieva.05@mail.ru*

Цель работы – изучение возможности селективной карботермической твердофазной металлизации хромовых руд Сарановского месторождения путем восстановления руды с недостатком углерода с извлечением железа в попутный железохромовый сплав и обогащением концентрата хромом.

Материал исходной технологической пробы представлен фрагментами хромовой руды и вмещающих пород.

Хромовая руда обладает массивной (содержание хромшпинелида 90 %), реже густовкрапленой текстурой (содержание хромшпинелида



70–90 %). Минеральный и химический составы руды приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1. Минеральный состав руды

Минералы	Содержание, %
Хромшпинелид	53,5
Хлорит	14,1
Серпентин	17,7
Кальцит	1,9
Доломит	3,5
Диопсид	0,3
Плагноклаз	1,7
Роговая обманка	2,3
Тальк	3,6
Гидролюда	1,4
Магнетит	0,2
Итого:	100,0

Таблица 2. Химический состав руды

Минерал	Содержание, %
NaO	0,39
MgO	20,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12,6
SiO <sub>2</sub>	16,3
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,11
S <sub>общ</sub>	0,05
K <sub>2</sub> O	0,2
CaO	2,8
MnO	0,15
TiO <sub>2</sub>	0,46
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	25,7
Fe <sub>общ</sub>	12,5
FeO	12,8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,7
ППП	6,88

Проведен комплекс исследований, позволяющий оценить эффективность применения процесса рентгенорадиометрической сепарации (PPC).

Объекты исследования: промпродукт, содержание, (%): Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 47,59, FeO – 33,11 (Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/FeO=1,3) и концентрат обогащения PPC, содержание (%): Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 50,00, FeO – 33,92 (Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/FeO=1,5). Химический состав хромовой руды и продуктов металлизации определяли с помощью рентгено-флуоресцентного анализатора «Магний-1».

Химический состав промпродукта и концентрата PPC приведен в табл. 3.

Для металлизации использовали брикеты крупностью – 0,1 мм. Брикеты изготавливали с введением в шихту отсевов полукокса. Состав отсевов полукокса марки П-3 приведен в табл. 4.

В качестве связующего использовали калиевое жидкое стекло ( $d=1,3 \text{ г/см}^3$ ) и модификатор жидкого стекла «Пенолит ЖСС».

Таблица 3. Химический состав промпродукта и концентрата PPC

Компонент	Содержание, %	
	Промпродукт	Концентрат
MgO	5,30	3,95
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,98	4,78
SiO <sub>2</sub>	7,44	5,27
NiO	0,50	0,60
CaO	1,37	0,79
ZnO	0,15	0,19
TiO <sub>2</sub>	0,56	0,50
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	47,59	50,0
FeO	33,11	33,92
Итого	100,0	100,0

Таблица 4. Состав отсевов полукокса марки П-3

Летучие, V, %	Углерод, C, %	Влажность, W, %	Зольность, A, %
10,0	70,0	5,0	15,0

Содержание полукокса в рудокосовых брикетах варьировали от 6–18 %, температуру восстановления – от 1100 до 1680 °С, продолжительность от 40 до 60 мин. Появление металлической фазы определяли металлографическим путем, а разделение продуктов проводили путем отмагничивания.

*Методика приготовления брикетов.* Навеску образца тщательно смешивали со связующим, засыпали в металлическую форму и путем виброударов частотой 25 Гц при помощи электрического вибромолотка по металлическому бойку в течении 15 сек формировали цилиндрический брикет. Объем брикета – 10 см<sup>3</sup>, высота брикета – 24 мм, масса сырого брикета – 30 г. Готовый брикет выдавливали из формы, выдерживали при 20–22 °С в течении 24 час.

Набор брикетов разного состава размещали в графитовом контейнере и для изоляции друг от друга пересыпали крупнозернистым корундом.

Условия эксперимента – изотермическая выдержка брикетов в течение 40–60 мин при температуре 1100, 1300 и 1400 °С в восстановительной атмосфере.

Образец брикета промпродукта, выдержанный при 1100 °С в течение 60 мин, снова нагревали до 1680 °С, выдерживали 10 мин и закаливали на воздухе.

Подготовленный таким образом контейнер с образцами нагревали токами высокой частоты до заданной температуры и выдерживали определенное время. Температуру опыта измеряли термомпарой ПР 6/30 с точностью  $\pm 5^\circ\text{C}$ , а поддерживали в пределах  $\pm 20^\circ\text{C}$ .

После эксперимента контейнер извлекали из индукционной печи, остужали на воздухе. Из одного образца одинакового состава изготавливали шлиф для металлографического исследования, второй дробили до крупности  $<0,5$  мм и отмагничивали. Магнитную и немагнитную

фракции отдельно анализировали на рентгенофлуоресцентном анализаторе.

Начало металлизации с образованием крупных включений металла размером  $> 10$  мкм начинается при  $t = 1300^\circ\text{C}$  и содержании полукокса  $>10\%$ . Однако значимого изменения химического состава магнитной и немагнитной фракции спеченного рудокосового брикета при этом не происходит.

Химический состав продуктов магнитного разделения рудокосовых брикетов промпродукта и концентрата после изотермической выдержки при 1100 и 1300  $^\circ\text{C}$  приведен в табл. 5.

**Таблица 5. Химический состав продуктов магнитного разделения рудокосовых брикетов промпродукта и концентрата после изотермической выдержки при 1100 и 1300  $^\circ\text{C}$**

Продукт	Содержание С, %	t°, С	Время, мин	Выход, %	Содержание, %			Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /FeO
					Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	NiO	
Промпродукт								
Н/м. фр. М. фр.	6	1100	60	96,32 3,68	46,80 51,04	33,85 40,53	0,46 0,57	1,38 1,26
Н/м. фр. М. фр.	10			91,26 8,74	46,53 47,79	35,39 36,82	0,59 0,30	1,31 1,30
Н/м. фр. М. фр.	14			71,26 28,74	46,30 47,34	71,26 28,74	0,41 0,51	1,20 1,31
Н/м. фр. М. фр.	6			1300	40	95,85 4,15	49,53 45,44	40,43 39,77
Сл. м. фр. М. фр.	10	66,06 33,92	46,01 48,42			34,58 37,27	0,97 0,39	1,33 1,30
Сл. м. фр. М. фр.	14	5,38 44,62	49,96 49,31			36,53 36,47	0,25 0,36	1,37 1,35
Концентрат								
Н/м. фр. М. фр.	6	1100	60	97,63 2,37	50,85 49,24	36,50 38,71	0,20 0,57	1,39 1,27
Сл. м. фр. М. фр.	10			80,26 19,74	51,98 51,02	36,03 36,91	0,61 0,34	1,44 1,38
Н/м. фр. М. фр.	14			88,76 11,24	51,62 50,18	37,87 36,28	0,33 0,55	1,36 1,38
Сл. м. фр. М. фр.	6			1300	40	87,01 12,99	47,88 50,40	34,48 35,76
Сл. м. фр. М. фр.	10	60,68 39,32	50,69 52,75			33,76 35,91	0,23 0,23	1,50 1,47
Сл. м. фр. М. фр.	14	83,85 16,15	56,07 52,88			29,99 34,46	0,94 0,53	1,87 1,53

*Примечание:* М. фр. – магнитная фракция; Н/м. фр. – немагнитная фракция; Сл. м. фр. – слабомагнитная фракция

Интенсивная металлизация с образованием крупных включений металла крупностью  $>100$  мкм происходит при  $t=1400^\circ\text{C}$  и содержании полукокса  $>10\%$ . Полученные результаты по селективной твердофазной металлизации приведены в табл. 6.

При переходе в область твердофазной металлизации при нагреве образцов до  $1680^\circ\text{C}$  происходит быстрое образование крупных капель жидко-

го железистого сплава на поверхности пластичного брикета. При содержании 10 % полукокса в брикете содержание Fe в металле достигает 67,89 % при содержании Cr – 26,56 %. Отношение  $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{FeO}$  в оставшейся части брикета – 2,3 (табл. 7).

Повышение содержания полукокса в брикете до 14 % и более нецелесообразно из-за растущих потерь хрома с попутным сплавом (содержание Cr – 31,51 %).

Таблица 6. Результаты селективной твердофазной металлизации рудоккоксовых брикетов (С полукокса >10 %, t = 1400 °С, τ – 40 мин)

Продукт, фракция	Выход, %	Содержание, %			Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /FeO
		Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	NiO	
Промпродукт:					
слабомагнитная	11,38	55,01	31,82	0,09	1,7
магнитная фракция	88,62	53,55	31,61	0,35	1,7
Концентрат					
слабомагнитная	83,95	58,90	28,22	0,18	2,0
магнитная фракция	16,05	57,64	29,04	0,49	2,1

Таблица 7. Результаты твердофазной металлизации рудоккоксовых брикетов (t<sub>1</sub> = 1100 °С, 60 мин; t<sub>2</sub> = 1680 °С, τ – 10 мин)

Состав продукта	Содержание С в брикете, %	Содержание, %					Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /FeO	Cr/Fe
		Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr	FeO	Fe	Ni		
Брикет	6	49,84		36,21		0,13	1,4	
капля металла			46,86		38,93	–		1,2
Брикет	10	41,75		18,31		0,06	2,3	
капля металла			26,56		67,89	0,00		0,4
капля металла	14		31,51		63,13	–		0,5

По данным рентгенофазового анализа промпродукта и концентрата хромовой руды в восстановительных условиях главной фазой в составе полученных продуктов изотермической выдержки при t=1400°С является остаточный хромит, который по сравнению с первичным хромитом обогащен алюминием вследствие частичного выхода из кристаллической структуры минерала ионов железа и хрома, восстановленного до атомарного состояния. На это указывает уменьшение параметра элементарной ячейки хромита с увеличением степени восстановления (металлизации) руды.

Высвободившиеся нейтральные атомы железа и хрома образуют три кристаллические фазы:

а) металлическую фазу структурного типа α-Fe  
б) парамагнитную фазу структурного типа γ-Fe  
в) карбид хрома Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>. Фазы Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub> и α-Fe являются обычными компонентами феррохрома.

Выход α-Fe и Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub> (феррохрома) в опытах с 14 % добавкой углерода много выше, чем в опытах с 10 % добавкой углерода.

### Выводы

1. Исследования на промпродукте Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 47,59, FeO – 33,11 % (Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/FeO=1,3) и концентрате обогащения рентгенорадиометрической сепарации Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 50,00, FeO – 33,92 % (Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/FeO=1,5) показали возможность проведения селективной карботермической металлизации хромовых руд Сарановского месторождения.

2. Определены оптимальные условия восстановления: содержание полукокса в рудохромовых брикетах – 10 %, t ≥ 1400°С, τ – 40 мин.

После магнитной сепарации состав магнитной и немагнитной фракций промпродукта и концентрата, соответственно (масс. %): Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 53,55, FeO – 31,61; Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 55,01, FeO – 31,82; Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 57,60, FeO – 29,04; Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 58,90, FeO – 28,22.

Магнитный способ разделения продуктов металлизации хромовых руд неэффективен из-за наличия магнитных свойств как у металлической фракции, так и у оставшейся шпинельной части материала.

3. При твердожидкофазной металлизации (нагрев до t<sub>1</sub>=1100°С, затем до t<sub>2</sub>=1680°С, τ – 10 мин) образуются крупные капли жидкого железистого сплава на поверхности пластичного брикета. При содержании 10 % С в брикете содержание Fe в металле – 67,89 при Cr – 26,56 %. Отношение Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/FeO в оставшейся части брикета достигает 2,3.

4. Проведенный рентгенографический фазовый анализ продуктов металлизации показал, что главной фазой в составе полученных продуктов является остаточный хромит. По сравнению с первичным хромитом он обогащен алюминием вследствие частичного выхода из кристаллической структуры минерала ионов железа и хрома.



## ГЕОЛОГО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ХРОМИТОВЫХ РУД АГАНОЗЕРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАРЕЛИИ

Кевлич В. И., Фролов П. В.

ИГ КарНЦ РАН, г. Петрозаводск

В настоящее время Россия удовлетворяет свои потребности в хромитовом сырье менее 30 % за счет своих месторождений, остальную часть экспортирует из стран ближнего и дальнего зарубежья [1]. В этой связи существует необходимость развития горнопромышленного комплекса Карелии – в частности освоения месторождений и рудопроявлений Онежского рудного района, в том числе и месторождения хромитовых руд, возникает потребность их минералогического изучения.

Месторождения и рудопроявления хромита Фенно-Скандинавского щита расположены в пределах Кольского региона (Мончеплутон, Падос), Восточной Карелии (Бураковский массив – Аганозерское и Шалозерское) и Финляндия (Кеми) и все они приурочены к расслоенным интрузиям раннепротерозойского возраста (2,50–2,44 млрд. лет), сформированным на ранних этапах заложения вулканогенно-осадочных прогибов рифтогенного типа.

В результате работ, выполненных Карельской экспедицией в последние 20 лет, в т. ч. большого числа скважин, пробуренных в области сочленения блоков, получены новые данные и выявлен хромитовый горизонт в Шалозерском блоке, подобный обнаруженному ранее сотрудниками ИГ КарНЦ РАН (Лавров М. М., Трофимов Н. Н.) хромитовому горизонту в Аганозерском блоке и названному «Главным Хромитовым Горизонтом» (ГХГ). Оба горизонта характеризуются сходным составом, строением и положением в разрезе и представляют единый Главный Хромитовый Горизонт интрузива [2]. Это позволяет рассматривать хромитовые руды и основной рудный минерал – хромит в онтогенетическом и технологическом аспекте как продукт единого генезиса.

Хромитовое оруденение Бураковского массива (рис. 1) приурочено к верхней части разреза перидотитовой подзоны (маломощные прослои и линзы) и к границе ультраосновной и пироксенитовой зон (ГХГ) расслоенной серии массива. Всего в разрезе известно восемь горизонтов мощностью от 0,1 до 9 м, но из них только ГХГ имеет промышленное значение и находится на

границе ультраосновной зоны (УЗ) и переходной зоны (ПЗ). Переходная и габбро-норитовая зоны содержат лишь акцессорную вкрапленность, преимущественно в единичных перидотитовых слоях. В УЗ хромитовые горизонты (т. е. рудообразующие хромиты) установлены только в её верхней перидотитовой части.

В дунитовой части УЗ хромшпинелиды образуют акцессорную вкрапленность – раннемагматическую идиоморфную кумулусную и интерстициальную гетерадкумулятивную. Акцессорный хромит наблюдается в виде мелких идиоморфных или округлых 0,1–0,05 и до 0,01 мм оптически гомогенных включений в оливине, серпентине и пироксене. В таблице 1, рис. 2, приводятся составы акцессорных и рудообразующих хромитов, откуда следует, что они характеризуются самой низкой железистостью и наибольшей глиноземистостью, в них также больше содержится цинка, меньше титана и никеля.

В пределах Аганозерского блока Бураковской расслоенной интрузии хромитовые руды выходят на дневную поверхность только на одном участке в северной части блока. Здесь в одном километре к северо-востоку от северной оконечности оз. Аганозера канавой № 1, пройденной сотрудниками института геологии, вскрыт на полную мощность ГХГ. Мощность горизонта 0,27–3,15 м. По литологическому составу четко выделяется подошва интервала, проведенная по границе между хромитсодержащими (6,20 %  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) апоперидотитовыми пойкилитовыми серпентинитами и хромитовыми пироксенсодержащими аподунитами, серпентинитами. Верхняя граница богатых руд также выделяется литологически. Перекрываются они безрудными апоперидотитовыми серпентинитами ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$  – 0,45 %). Нижняя и верхняя границы выделяемых богатых руд хорошо фиксируются (рис. 3 и 4) *уменьшением плотности и магнитной восприимчивости*. Геолого-минералогическое опробование хромитовых руд Аганозерского месторождения проводилось в пределах ГХГ с учетом основных текстурно-структурных особенностей руд.

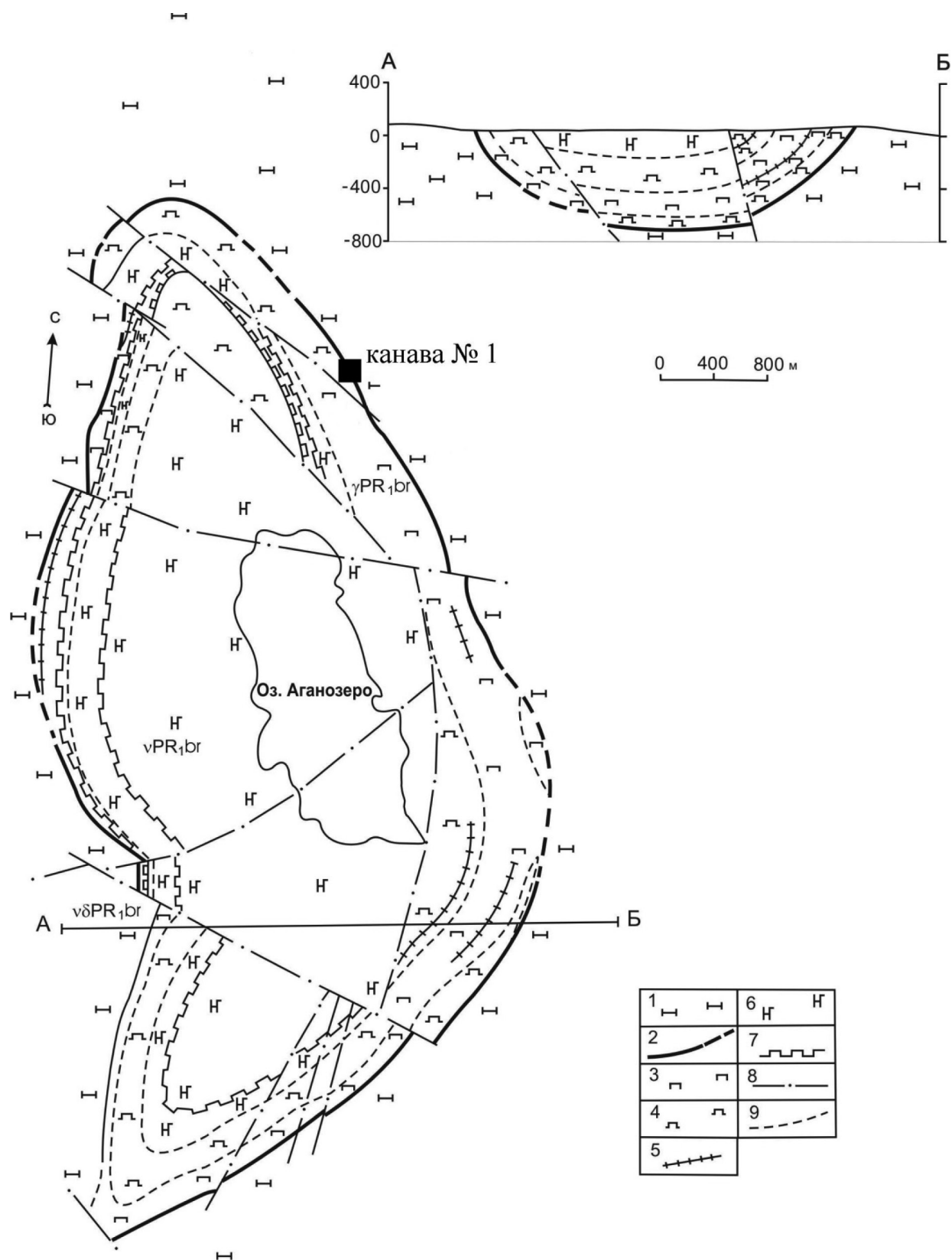


Рис. 1. Схематический геологический план Аганозерского месторождения хромовых руд (по материалам В. Н. Логинова, 1995)

Нижний протерозой, бураковский комплекс расслоенных интрузий: ультраосновная зона, перидотиты (1), в кровле – ГХГ (2); пироксенитовая зона, клинопироксениты, в т. ч.: оливиновые (3), вебстериты (4), прослои верлитов (5); габброноритовая зона, габбронориты (6), горизонты и линзы вебстеритов (7); тектонические нарушения – 8, геологические границы – 9.

В генетическом отношении ГХГ представляет стратиформную залежь, слои которой обособляются в породы, в разной степени обогащенные хромитом. Мощность горизонта 0,27–2,10 м и до 3,10 м. В описании разреза по стратам основное внимание уделяется главному рудному минералу, характеру вкрапленности, раз-

мерности и количественному содержанию хромита, а также породообразующим минералам. Это позволяет, с одной стороны, охарактеризовать геолого-минералогические особенности пород, а с другой, рассмотреть технологические параметры хромита для разработки схем рудоподготовки и обогащения.

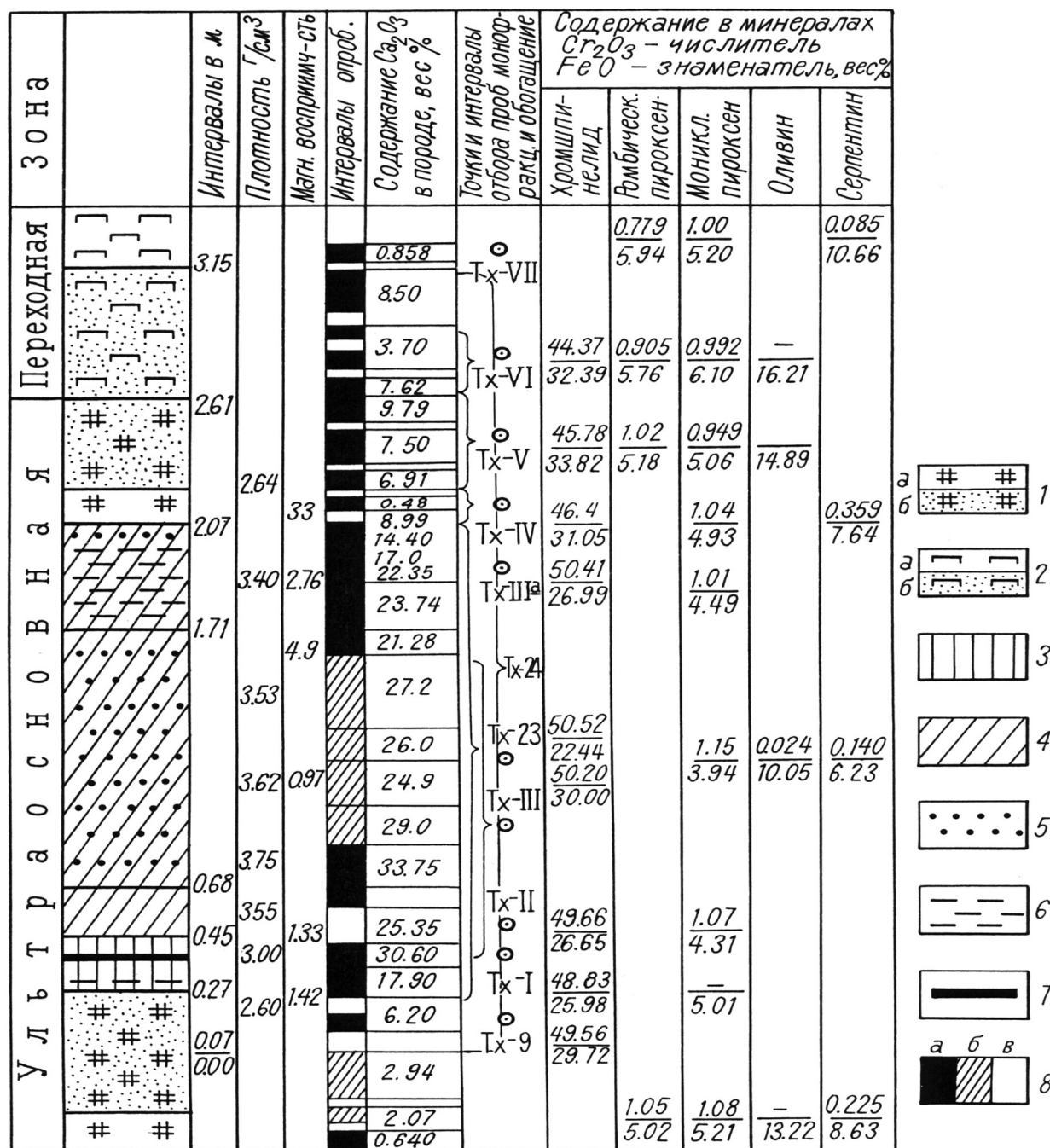


Рис. 2. Схема разреза главного хромитового горизонта (Трофимов Н. Н., Лавров М. М., Кевлич В. И.), интервалы опробования, свойства пород и содержание  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  в породах и минералах:

1 – апоперидотитовый серпентинит: а) 1–2 %; б) 5–2 % (хромита); 2 – пироксенит: а) 1–2 %; б) 5–2 % (хромита); 3 – хромитовые дуниты (хромита 30–60 %); 4 – хромитовые перидотиты (хромита 40–60 %); 5 – слои оливинового состава; 6 – слои хромитового состава; 7 – массивные хромититы; 8 – интервалы опробования: а – химический анализ, б – рентгеноспектральный анализ, в – не опробованы



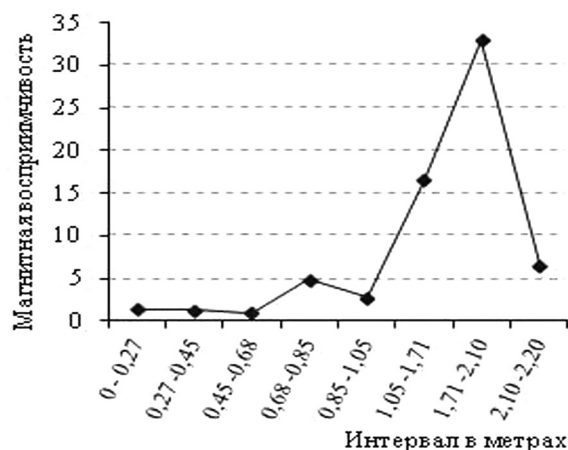


Рис. 3. Магнитная восприимчивость хромитовых руд

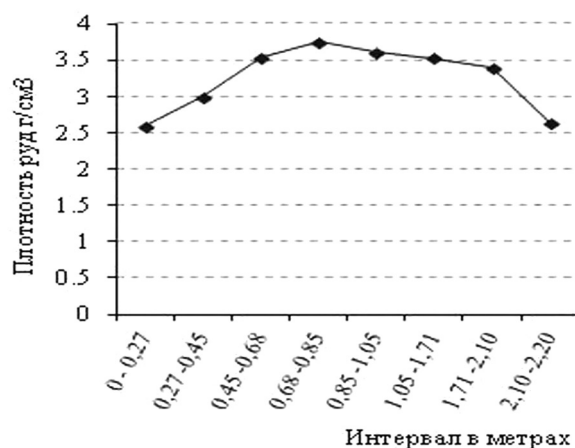


Рис. 4. Плотность хромитовых руд

Таблица 1. Состав генераций аксессуарных и рудообразующих хромитов ультрамафитовой зоны Бураковской интрузии, в масс. %

Компоненты	Аксессуарные (ДП, С13г/218,1)		Рудообразующие ГХГ		
	I(2)	II(2)	I(2)	II(7)	III(7)
	1	2	3	4	5
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	49,178	49,234	50,693	50,228	50,181
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,902	15,748	8,822	8,812	9,634
MgO	11,313	11,071	10,954	10,485	10,567
FeO	20,167	20,836	26,427	26,544	26,502
NiO	0,156	0,133	0,221	0,236	0,232
TiO <sub>2</sub>	1,015	0,623	1,052	1,342	1,259
ZnO	0,287	0,334	0,041	0,082	0,082
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,276	0,226	0,164	0,226	0,191
MnO	0,596	0,648	0,554	0,533	0,536
Сумма	99,89	98,85	98,93	98,49	99,18

Примечание. Анализы выполнены на микрозонде MS-46 «Камека» С. А. Реженовой, Кольский НЦ РАН. В скобках количество анализов.

Текстуры руд, слагающих ГХГ, изучались визуально и микроскопически в шлифах и аншлифах и в измельченном материале. Среди основных текстур – ритмичнополосчатая, ветвистополосчатая, вкрапленная. Для вкрапленной более

подходит термин микротекстуры вследствие малых (0,03–0,2 мм) размеров кристаллов хромита, образующих пойкилитовую вкрапленность в крупных и гигантских (до 10 мм) ойкокристаллах моноклинного пироксена (рис. 5, 6, 7).



Рис. 5. Вкрапленная микротекстура. Структура идиоморфнозернистая соприкосновения



Рис. 6. Ритмично-полосчатая и ветвисто-полосчатая текстуры. Средняя часть Главного хромитового горизонта, инт. 0,8–1,2 м



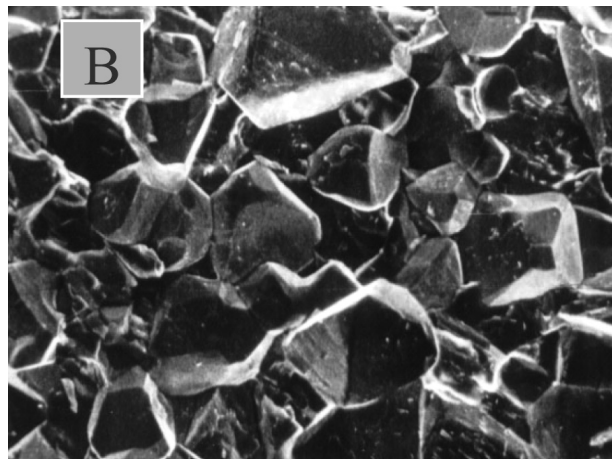
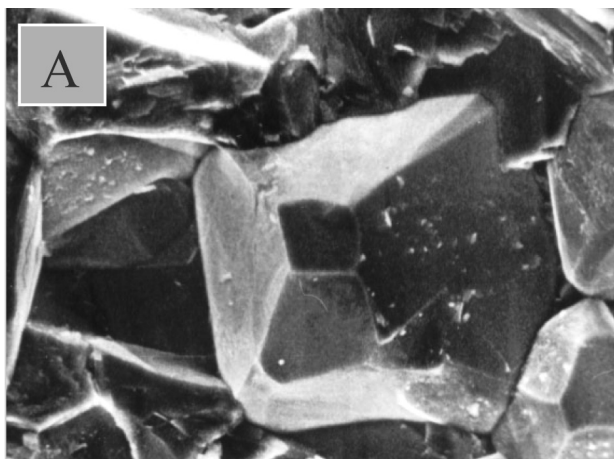


Рис. 7. Проба густовкрапленной руды, Главный Хромитовый Горизонт Бураковского массива (Восточная Карелия), коренной выход. Увеличение: А – 405, В – 135

Структура массивных руд – полигональная – дорастания, структура вкрапленных руд – идиоморфнозернистая. Преобладают руды с вкрапленной микротекстурой.

Увеличение плотности руд отмечается в центральной части ГХГ и снижается по мере приближения к кровле и подошве.

Главный минерал рудной залежи – хромит – различается габитусом, обликом, размером, границами сростаний, присутствует в виде идиоморфных, гипидиоморфных и ксеноморфных кристаллов и является неоднородным по своему генезису, составу и, соответственно, физико-механическим свойствам. По составу хромиты Аганозерского и Шалозерского месторождения наиболее близки к хромитам месторождений Сопчезерское (Мончеплутон), Кеми (Финляндия), Бушвельдское (ЮАР).

Необходимость определения параметров физических свойств обусловлено их использованием в процессах обогащения.

В пределах Аганозерского месторождения на основании изучения текстурно-структурных особенностей хромитовых руд ГХГ, состава, содержания порообразующих и главного рудного минерала – хромита – возможно выделить три типа руд: богатые (густовкрапленные и сплошные), рядовые (редко и густовкрапленные), бедные (вкрапленные и рассеянно-вкрапленные).

Богатые руды (густовкрапленные) содержат более 45 об. % хромита, что соответствует расчетному содержанию  $\text{Cr}_2\text{O}_3 > 23$  мас. %. Текстуры таких руд – массивная, ритмично-полосчатая, ветвисто-полосчатая, густовкрапленная. Структура массивных руд – полигональная – дорастания, структура вкрапленных руд – идиоморфно-

зернистая. Преобладают руды с вкрапленной микротекстурой.

Рядовые руды (средневкрапленные) содержат более 20 %, – до 45 об. % хромита, что соответствует вариациям содержания  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  от 10 до 23 мас. %. К ним относятся редко и густовкрапленные руды при среднем и мелковкрапленном хромите, законсервированном, в основном, в пироксене, порой при увеличении содержания хромита образует монастростики хромита, сцементированные пироксеновым либо серпентиновым веществом.

Бедные руды (редковкрапленные) отличаются низким содержанием хромита (менее 20 об. %), что составляет от 6,20 до 10,1 мас. %  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  и рассеянно-вкрапленный характер его распределения. Залежи их находятся у кровли и подошвы горизонта и перемежаются с рядовыми рудами. Контуры данного типа руд определяются технологическими требованиями к сырью и принимаемым бортовым содержаниями  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ .

Наличие рядовых и бедных руд на месторождении требует рассмотрения возможности их предконцентрации уже на стадии добычи и последующем формировании типов и сортов руд в карьере для транспортирования на обогащение. Это позволит вывести из переработки существенную часть пустой породы, сформировать из горной массы руду и повысить стабильность и эффективность переработки хромитовых руд. Результаты лабораторных опытов, выполненных в ИГ КарНЦ РАН, свидетельствуют, что, с учетом текстурно-структурных особенностей, при дроблении руды до 10–15 мм и последующим обогащением в тяжелых средах (тяжелые жидкости, трибромэтан, тетрабромэтан, тяжелые суспензии и др.) в отваль-

ные хвосты может быть удалено порядка 2–3 % и до 4–5 % материала с граничным содержанием менее 2–3 %  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (преимущественно фракция из кусочков, представляющих собой агрегаты, состоящие главным образом из серпентина, в сравнении с пироксеном и вкрапленностью хромитовых зерен размером 1,5–0,2–0,05 мм и менее, и содержанием 4–6 %; на поверхности бурых, темно-зеленых, светлых зерен серпентина присутствуют гидроокисные пленки).

Кроме того, хромовые руды содержат сопутствующую платинометальную и золотую минерализацию. Платинометальная минерализация представлена соединениями двух классов:

- сульфидами тугоплавких платиноидов (Os-Ir-Ru);
- интерметаллидами платины с сидерофилами и халькофилами (Pt-Fe, Cu, Ni).

Сульфиды (86 %) представлены лаурит-эрлихманитом, интерметаллиды (14 %) – изоферроплатиной и аваруитом. Первые локализируются внутри зерен хромшпинелида, вторые – в их интерстициях. С наложенной сульфидной минерализацией имеет косвенную связь золотое оруденение. Максимальные содержания золота в хромовых рудах достигают 4,6 г/т (скв. 245). Средневзвешенные концентрации составляют: платины 0,087 г/т, палладия 0,12 г/т, родия 0,001 г/т, золота 0,25 г/т. По отдельным скважинам средневзвешенные содержания достигают: платины – 0,151–0,447 г/т, палладия – 0,143–0,71 г/т, золота – 0,198–4,54 г/т. Содержание тугоплавких платиноидов не превышают: осмий – 0,14 г/т, иридий – 0,1 г/т, рутений – 0,27 г/т. Содержание сопутствующей минерализации платиноидов и золота, с учетом использования современных технологий извлечения при обогащении и металлургическом переделе хромитовых руд, потенциально повышает ценность руд Аганозерского и Шалозерского месторождений.

Предварительными лабораторными технологическими исследованиями [Институт геологии, г. Петрозаводск 1988, ВИМС, 1991] установлена обогатимость хромовых руд по магнитно-гравитационной схеме с получением тонко-мелкозернистого концентрата, содержащего 48,15 %  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  и 28,7 % FeO при извлечении  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  в концентрат 70,7 %, и возможность улуч-

шения показателей обогащения. Имеются положительные результаты металлургического передела концентрата методом электрометаллургии с получением феррохрома с содержанием хрома и железа по 50 %. При оценке хромовых руд как сырья для производства огнеупорных магнезит-хромитовых изделий была выявлена их низкая огнеупорность (менее 1580 °C), однако определена возможность использования сырой руды как добавки к периклазовому порошку при изготовлении огнеупорных масс. Технологическим процессом установлено, что руды содержат извлекаемую платинометальную минерализацию микронных классов крупности.

Приведенные выше результаты, их анализ, в совокупности с литературными данными, позволяет сделать следующие выводы:

1. По своему генезису Аганозерское месторождение хромитовых руд является типичным раннемагматическим образованием, формирование которого обусловлено дифференциальной кристаллизацией хромита из магматического расплава ультраосновного состава.

2. В генетическом отношении Главный Хромитовый Горизонт представляет стратиформную залежь, слои которой четко обособляются в породы (рис. 2), в разной степени обогащенные хромитом.

3. Хромит – главный минерал рудной залежи, и по своему составу является неоднородным. Выделяются три генерации (с учетом времени кристаллизации), что требует подробного технологического изучения.

4. По своему составу хромиты наиболее близки к хромитам месторождений Кеми Финляндия и Сопчеозерскому Кольского полуострова, которые имеют раннепротерозойский возраст.

5. По содержанию, размерам и текстурно-структурным характеристикам возможно выделить три типа руд: богатые руды; рядовые руды; бедные руды.

6. Текстурно-структурные особенности, состав, технологические свойства слагающих ГХГ руд позволяют оценить не только качество хромитовых руд и применение традиционных методов обогащения, но и предсказать потери основных рудных минералов при дезинтеграции руд, а также направление разработки технологических схем обогащения хромитовых руд.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Поиски, разведка и оценка хромитовых месторождений. Москва: Недра, 1987. С. 162.

2. Трофимов Н. Н., Лавров М. М., Логинов В. Н., Никитин А. Н., Инина И. С. Латеральная и вертикаль-

ная изменчивость состава хромшпинелидов Бураковской расслоенной интрузии. // Минералогия магматических и метаморфических пород докембрия Карелии. Петрозаводск. 1994. С. 41–52.

3. Металлогения Карелии. // Отв. ред. С. И. Рыбаков, А. И. Голубев. Петрозаводск, 1999. С. 340.

4. Лавров М. М., Кевлич В. И. О происхождении хромитового оруденения Бураковской интрузии. Оперативно-информационные материалы. Петрозаводск, 1986.

5. Чантурия В. А. Современные проблемы обогащения минерального сырья в России. // Горный журнал, 2005. № 12. С. 56–64.

6. Щипцов В. В., Скамницкая Л. С., Бубнова Т. П., Данилевская Л. А. Роль геологических, минералогических и технологических исследований Института геологии КарНЦ РАН в оценке потенциала минерально-сырьевой базы Республики Карелия.

// Сб. научных статей по материалам Российского семинара по технологической минералогии. // Научный редактор В. В. Щипцов. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2010. С. 37–55.

7. Ожогина Е. Г., Котова О. Б., Чантурия Е. Л. Роль технологической минералогии в прогнозной оценке качества минерального сырья и его глубокой и комплексной переработки переработке. // Прогрессивные технологии комплексной переработки минерального сырья. М.: Издательский дом «Руда и металлы», 2008. С. 35–52.

8. Кевлич В. И., Светов С. В., Фофанов А. Д. Типоморфные особенности хромита и влияние их на выбор и условия направленного изменения свойств. // Направленное изменение физико-химических свойств минералов в процессах обогащения полезных ископаемых (Плаксинские чтения), Материалы международного совещания. Москва: Альтекс, 2003. С. 145.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМ НАХОЖДЕНИЯ ЗОЛОТА В СУЛЬФИДАХ

*Викентьев И. В.*

*ИГЕМ РАН, г. Москва*

Золото присутствует в рудах в двух формах: собственной минеральной и рассеянной в сульфидах [13, 15]. Минералы золота представлены самородным золотом и теллуридами, реже другими соединениями Au и Ag (табл. 1). Для колчеданных месторождений установлены те же закономерности [2, 5, 9, 18].

Подъем экономики стран России немислим без более полного использования рудного сырья

цветной металлургии, большинство месторождений которого являются комплексными. Особенно остро проблема комплексности стоит для колчеданных месторождений. Эти объекты являются важнейшим источником цветных и благородных металлов (особенно в России), ряда редких элементов (Co, Ni, Se, Te, Cd, Hg, Ge, Ga, Tl, In, Bi), обеспечивая 40 % мировой добычи серебра и 5 % золота.

Таблица 1. Химическое состояние и формы золота в рудах

Химическое состояние	Формы		Минералы
<b>Au<sup>0</sup></b> (свободное, металлическое)	<b>Самородная</b>		самородное золото, аурикуприд, вейшанит тетрааурикуприд, анюит, порпедит, родит
<b>Au<sup>+</sup>, Au<sup>3+</sup></b> (ионное, химически связанное)	<b>Изоморфная</b>		арсенопирит, As-пирит, блеклая руда, борнит, халькопирит, пирит
	<b>Минеральные</b>	теллуридная	калаверит, креннерит, сильванит, петцит, монтбрейт, мутманит
		сульфидная	ютенбогардит, петровскит, куриллит
		сульфотеллуридная	нагиагит
		висмутидная стибнидная селенидная оксидная	мальдонит ауростибит фишесерит ауроантимонат

При их отработке, подчас содержащих более 100 т попутного Au и более 2000 т Ag, весьма существенны потери благородных металлов

(в основном на стадии обогащения) – в отвальные хвосты попадает до 85 % от исходного количества золота, составляя по Уралу 12–15 т в



год. В результате по запасам накопленного металла хвостохранилища горно-обогатительных комбинатов (Гайского, Учалинского и др.) могут сопоставляться с крупными месторождениями золота. Обусловлены эти потери небольшой долей в рудах этих месторождений (Учалинское, Узельгинское, Гайское, Сафьяновское и др.) видимого золота (Рис. 1) и тем, что, 60–95 % Au относится к тонкодисперсной (невидимой) форме [2, 6, 10].

Термином «невидимое» золото обозначается его внеструктурное ультрамикроскопическое (менее 0,1 мкм) и структурное изоморфное состояние [7, 11, 12, 21]. Внеструктурная форма золота в основном отвечает его металлическому состоянию  $Au^0$ . Вхождение Au в окисленном состоянии в структуру сульфидов, за исключени-

ем арсенопирита  $FeAsS$  и As-пирита, спорно [14, 21]. Возможные формы Au в пирите (в том числе мышьяковистом) и в Fe–Cu сульфидах в виде «невидимого» золота: (1) Субмикроскопические включения самородного золота, Au-теллуридов или золотоносного арсенопирита; (2) Структурно-связанное золото по механизму гетеровалентного изоморфизма с вхождением его в виде компоненты  $AuAsS$  или  $(Au,As)_2S_2$ ; хемосорбция золота на поверхностях роста кристаллов пирита в виде  $Au^0$  или в виде  $Au^+$  с последующим восстановлением до  $Au^0$ ; как  $Au^+$  в составе комплекса  $Au(HS)^0$ ; как  $Au^+$  в катионной вакансии  $(Au^+_{py})$ , или как  $Au^+$  в виде кластеров  $Au_2S$ , или в результате адсорбции  $Au^+$  в виде частиц  $Fe(SAs)-Au(HS)^0$  или  $Fe(SAs)-Au_2S^0$ ; как  $Au^+$  в комплексах  $Fe(SAs)-Au(HTe)^0$  или  $Fe(SAs)-Au_2Te^0$  (см. обзор в [22]).

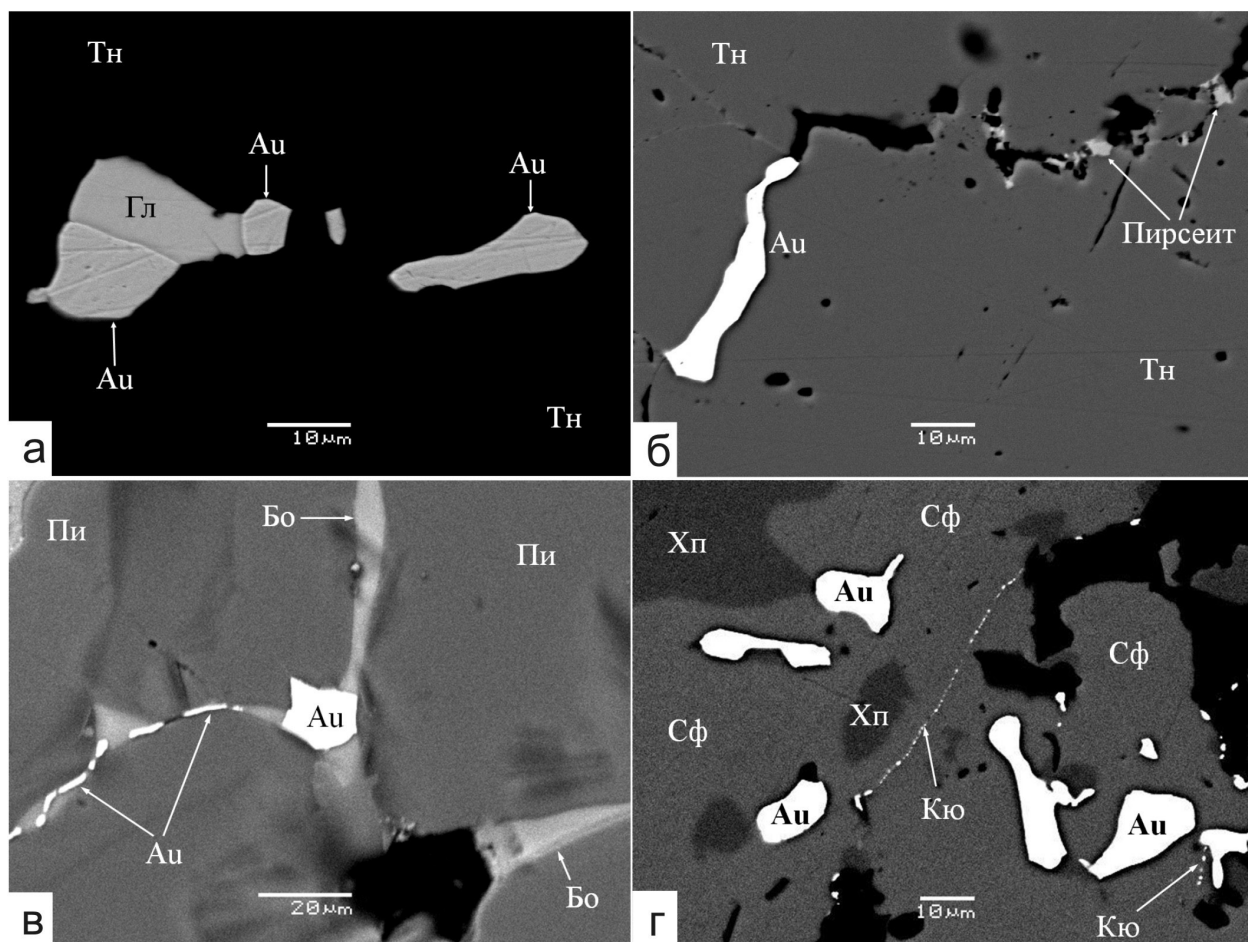


Рис. 1. Мелкое золото в наложенных минеральных ассоциациях колчеданных руд Урала.  
Фото в обратно-рассеянных электронах

а, б – детали барит-полиметаллических прожилков в руде Учалинского месторождения: а – самородное золото (Au) в ассоциации с галенитом (Гл) образует цепочку мелких выделений в блеклой руде (Тн); б – трещины и гнезда в теннантите ( $Ag,Cu$ ) $_{16}As_2S_{11}$ ; в – «тонкое» самородное золото с размером 5–10 и даже <1 мкм в рудах Гайского месторождения тяготеет к межзерновым границам (особенно пирита), Бо – борнит; г – зерна электрума и кюстелита (Кю) в Cu–Zn руде в экзоконтакте дайки. Кюстелит  $AuAg_3$ ,  $AuAg_5$  и  $AuAg_6$  образует тонкие прожилковидные скопления. Тарньер



Увеличение степени локальности исследований достигается в настоящее время несколькими путями. Для определения содержаний Au и Ag в микроколичествах наиболее высокая точность и воспроизводимость у метода инструментально-нейтронно-активационного анализа (ИНАА); стандартная навеска 50–100 мг, но могут анализироваться пробы до 10 нг, что делает возможным изучение распределения содержаний Au в разных генерациях одного сульфида, отобранных в виде монофракций (табл. 2). Именно эти исследования наиболее приемлемы для минералогических исследований колчеданных руд. На части колчедан-

ных и, особенно, золоторудных месторождениях с крайне неравномерным, в том числе «самородковым» распределением золота для анализа на благородные металлы более предпочтительным является использование больших навесок (от 1–5 г до 0,5–1 кг). Для их анализа могут быть рекомендованы методы, проводимые с предварительным химическим выделением золота – атомно-абсорбционный и атомно-эмиссионный спектрометрии, а также метод пробирного анализа, которым исследуются максимальные из названных навесок, что делает результаты опробования наиболее представительными.

Таблица 2. **Высокочувствительные физические методы анализа золота (в сульфидах, силикатах)**

Метод	Что определяет	Препарат	Разрешение (нм, мкм), навеска (мг)	Предел чувств-ти $C_{Au}$ (г/т)
Инструментальный нейтронно-активационный анализ	Содержание Au и др. элементов (Ag, As, Sb, Te, Se, Hg, Co, Ba, Fe, Zn)	Порошок, зерна	0,1 мг	0,05
Вторичная ионная масс-спектрометрия	Наличие и равномерность распределения Au по площади образца; наличие включений на глубине до 2 мкм	Аншл. (участок 50–150 мкм)	10 нм	0,03–0,1
Локальный масс-спектрометрический анализ с лазерной абляцией (LA-ICP-MS)	Содержание Au и многих др. элементов в точке ( $\varnothing$ 10–100 мкм) и по профилю до 2 мм длиной	Аншл., запresse-совка	10–20 нм	0,005–0,03
Авторадиография [4]	Наличие и равномерность распределения Au по площади образца	Пластика 2×3 см (до 3×5 см)	0,01–0,1 мм	0,5–1

Содержание золота и серебра в индивидуальных зернах рудных минералов и состав их собственных минералов (в зернах >1 мкм) исследуются с помощью рентгеноспектрального микроанализа (РСМА) на микроанализаторах Camebax, Cameca, JXA (табл. 3). В настоящее время в исследовательские центры поставляются высокоразрешающие (до 10 нм) и довольно чувствительные приборы, относя-

щиеся к восьмому поколению микроанализаторов (например, JXA-8100/8200, JXA-8700). Однако концентрационной чувствительности РСМА при рядовом анализе (0,02 мас. %) недостаточно для определения Au в сульфидах, поэтому может быть использован прием увеличения экспозиции в точке до 100–200 с, соответственно предел его обнаружения достигает 0,005 мас. % [22].

Таблица 3. **Спектроскопические методы анализа невысокой чувствительности**

Метод	Что определяет	Препарат	Разрешение (мкм), навеска (мг)	Предел чувствительности $C_{Au}$ (г/т)
Рентгеноспектральный микроанализ	Наличие макропримесей в сульфидах, состав минералов Au	Аншл.	1–2 мкм	200 (50*)
Аналитическая электронная микроскопия	Диагностика минералов, состав минералов Au	Аншл., насыпные препараты	0,5–1 мкм	200–500
Высокоразрешающая сканирующая электронная микроскопия	Диагностика минералов, состав минералов Au	Аншл., монтированные шлифы	1–3 нм	200–500
Рентгеновская абсорбционная спектроскопия в ближней области (EXAFS, XANES)	Au <sup>0</sup> или связанное (Au <sup>1+</sup> , Au <sup>3+</sup> ) и его координация	Порошок, зерна	100 мг	100–1000
Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (XPS)	Энергия связи, валентность Au	Порошок, зерна	100 мг	100–1000
Мёссбауэровская спектроскопия ( <sup>197</sup> Au)	Электронное окружение ядер (связанное Au или Au <sup>0</sup> )	Порошок, тонкий срез	100 мг	20–50

\* при времени счета 100–200с

Удобен для диагностики минералов ( $>0,5$  мкм) и получения картин их сростаний и микронеоднородностей состава индивидуальных зерен электронный микроскоп с энергодисперсионной приставкой, включая новейшие высоколокальные (1–3 нм) модификации и автоматизированные системы «количественной минералогии» (QemScan и Mineral Liberation Analysis). В то же время для анализа содержаний **Au и Ag в обычных сульфидах** аналитическая электронная микроскопия не может быть использована в связи с недостаточной чувствительностью (0,02 мас. %). Наиболее перспективным аналитическим методом для определения микропримесей (включая Au) в сульфидах является высокочувствительный метод локального масс-спектрометрического анализа с лазерной абляцией (LA-ICP-MS). Этот метод – локальный (диаметр пучка лазера 10–100 мкм), высокочувствительный (см. табл. 2) и относительно, по сравнению с SIMS, недорогой [16–18]. Он позволяет в одной и той же точке анализировать до 40 химических элементов, поэтому по комплексу элементов можно оценить состав включений редких минералов в сульфидах и уверенно определить в составе последних наличие широкого круга ценных элементов-примесей. К сожалению такого рода аппаратура, имеющаяся в России, в количестве порядка 10 используется для решения других задач. В приложении к анализу сульфидов метод применяется пока только в ИГЕМ РАН.

Для выявления в рудах собственных минералов благородных металлов хорошо зарекомендовал себя прием выделения ультратяжелых фракций из крупных проб (0,5–1 кг), в которых предварительным анализом были установлены повышенные содержания Au. Проводится разделение обесшламленных проб с помощью электромагнитных сепараторов и в тяжелых жидкостях: после отмывки в воде и бромформе гранулометрических фракций +0,06. . . –0,1 и –0,06 мм получен-

ный ультратяжелый концентрат идет на изготовление монтированных шлифов и насыпных препаратов для исследования на микроанализаторах.

Для примерной оценки возможных форм нахождения золота в сульфидах используются данные *рационального* (фазового) анализа [8], обычно используемого в отечественной практике оценки технологических свойств золотосодержащих руд и в настоящее время в полноформатном варианте выполняемого лишь единичными лабораториями страны для представительных навесок (1 кг) из технологических проб руд (табл. 4). В основе методики лежит различная химическая устойчивость форм золота при растворении включающих его сульфидов и силикатов. Относительно крупное свободное золото извлекается из руды амальгамацией, мелкое самородное золото в тонких сростках с сульфидами – цианированием, тонкодисперсное (вероятно, в основном структурно-связанное) золото в сульфидах – извлекается цианированием после разложения нерастворенного цианидом остатка в азотной кислоте (“упорное” золото). Такой метод имеет естественные ограничения, обусловленные тем, что степень химической экстракции золота определяется не только его минеральной формой и крупностью, но и разной доступностью субмикроскопических выделений минералов золота для контакта с химическим реагентом, зависящей от наличия микронеоднородностей (пор, микротрещин, дефектов кристаллической решетки минерала-хозяина) в структуре вмещающих минералов.

Формы нахождения золота в сульфидных рудах, в том числе наличие структурно-связанного золота, могут быть установлены с помощью ряда новейших физических методов. Для большинства месторождений свойственен примесный характер концентрирования золота в главных рудобразующих минералах – пирите, халькопирите, сфалерите и обычно второстепенных борните, теннантите, галените.

Таблица 4. Химические методы анализа форм золота

Метод	Что определяет	Навеска	Предел чувствительности $C_{Au}$ (г/т)
Рациональный (фазовый) анализ	Примерная оценка форм нахождения золота в сульфидах: свободное золото; золото в сростках с сульфидами силикатами; тонкодисперсное (“упорное”) золото	1 кг	0,1–0,5
Термохимический метод	Содержание золота в ионной форме	5–10 г	0,2–0,5
Разложение сульфидной матрицы в расплаве КОН с последующим промыванием на атомных фильтрах*	Наличие самородного Au, размер и морфология его выделений	5–10 г	1–5

\*разработка ИГЕМА [6]

В этих минералах концентрация Au варьирует от 1 до 100 г/т. Это не позволяет применить традиционные структурные методы исследований (рентгеновская дифракция, инфракрасная спектроскопия и др.). Тонкие физические методы, ориентированные на определение элементов, в первую очередь широко распространенные микрорентгеноспектральные (в том числе рентгено-флуоресцентный анализ на синхротронном излучении в сочетании с инструментальным нейтронно-активационным анализом), а также вторичная ионная масс-спектрометрия (SIMS) не позволяют провести индикацию состояния золота в матрице сульфидов, кроме оценки равномерности его распределения и, в случае SIMS, выявления включений самородного золота размером порядка 10 мкм. В работах, которые являются по сути единичными и за рубежом и тем более в России [1, 14, 18–20], в основном используются, с одной стороны, SIMS с концентрационной чувствительностью, на три порядка превышающей таковую рентгеновских микроанализаторов (0,01–0,01 г/т Au), и, с другой стороны, – мессбауэровская спектроскопия ( $^{197}\text{Au}$ ), позволяющая различить золото, входящее в структуру сульфидов, и свободное золото в виде микровключений. Мессбауэровская спектроскопия в состоянии оценить валентное состояние золота (или присутствие его самородной формы) при концентрациях его в сульфидах 0,05–0,1 мас. % и выше (что встречается крайне редко). Из спектроскопических методов исследования состояния Au в сульфидах наиболее информативными оказались рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (XPS) и рентгеновская адсорбционная спектроскопия в ближней области (XANES).

Для оценки реальной доли легко извлекаемого золота по отношению к тонкодисперсному, «невидимому» был предложен *термохимический метод* определения ионной формы Au в суль-

фидных рудах [3]. Выяснилось, что доля ионного золота (изоморфная примесь в основных сульфидах, а также в виде Au–Ag теллуридов [9] и др. соединений) варьирует от 1 до 69 % в изученных рудах и от 5 до 38 % в пробах из продуктов их обогащения. Минимальная доля ионного золота (1 % от валового содержания) в динамометаморфизованном Гайском месторождении коррелирует с данными о резко преобладающей здесь самородной форме нахождения Au [22]. Рост доли ионного золота в рудах отвечает увеличению содержания Cu и уменьшению степени их метаморфизма.

### Выводы

1. В неметаморфизованных колчеданных рудах преобладает тонкодисперсное золото (до 95 % от валового содержания в рудах): относительно равномерно распределенная субмикронная вкрапленность самородного золота в пирите и халькопирите, а также ионное (в том числе – структурно-связанное) золото в сульфидах.

2. В метаморфизованных рудах большая часть Au присутствует в виде видимых выделений самородного золота, часто ассоциируя с теннантитом, галенитом, кварцем, а также редкими минералами Au, Ag, Ge, Sn и Bi. Происхождение рудных ассоциаций с видимым самородным золотом в основном связано с наложенными процессами гидротермального или метаморфического преобразования колчеданных залежей.

3. По всей вероятности, в Cu–Fe и Cu сульфиды золото входит в основном в виде твердого раствора, а в пирите и сфалерите, по-видимому, преобладают тончайшие включения выделений самородного золота и других Au–Ag минералов.

*Исследования выполняются при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 14-17-00693) и техническом содействии предприятий УГМК, РМК и НПО «Полиметалл».*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Бортников Н. С., Кабри Л., Викентьев И. В. и др. Невидимое золото в сульфидах из современных колчеданных построек: К вопросу о поведении золота в субмаринных гидротермальных системах // Геология рудных месторождений. 2003. № 2. С. 510–542.
2. Викентьев И. В., Молошаг В. П., Юдовская М. А. Формы нахождения и условия концентрирования благородных металлов в колчеданных рудах Урала // Геология рудных месторождений. 2006. № 2. С. 91–125.

3. Винокуров С. Ф., Викентьев И. В., Сычкова В. А. Определение ионной формы золота в колчеданных рудах // Геохимия. 2010. Т. 48. № 5. С. 544–550.
4. Жмодик С. М., Верховцева Н. В., Нестеренко В. Ф., Чиков Б. М., Жмодик А. С., Немировская Н. А., Айрияц Е. В., Мороз Т. Н. Экспериментальное исследование перераспределения золота в процессе ударно-волновой нагрузки пирит-кварцевой смеси (с использованием радионуклида  $^{195}\text{Au}$ ) // Геохимия. 2004. № 12. С. 1285–1300.

5. Зайков В. В., Мелекесцева И. Ю. Минералы золота и серебра в рудных фациях золото-колчеданно-полиметаллических месторождений Баймакского рудного района, Южный Урал // Литосфера. 2011. № 6. С. 47–67.
6. Кринов Д. И., Бортников Н. С., Чантурия Е. Л. Новые данные о распределении самородного и химически связанного золота в колчеданных рудах на примере Гайского месторождения (Южный Урал) // Мат. Межд. конф. «Новые идеи в науках о Земле». М.: МГГРА, 2007. С. 181–183.
7. Лаптев Ю. В., Розов К. Б. Взаимодействие золота с поверхностью сульфидов как фактор его концентрирования при гидротермальном рудообразовании // Докл. РАН. 2006. Т. 410. № 5. С. 663–667.
8. Лодейщиков В. В. Технология извлечения золота и серебра из упорных руд. Иркутск: Иргиредмет, 1999. 342 с.
9. Молошаг В. П. Теллуридная минерализация колчеданных месторождений Урала: новые данные // Литосфера. 2011. № 6. С. 91–102.
10. Петровская Н. В. Самородное золото. М.: Наука, 1973. 347 с.
11. Таусон В. Л., Пастушкова Т. М., Бессарабова О. И. О пределе и форме вхождения золота в гидротермальный пирит // Геология и геофизика. 1998. Т. 39. № 7. С. 924 – 933.
12. Таусон В. Л., Салихов А., Матшуллат Й, Смагунов Н. В., Бессарабова О. И., Меньшиков В. И., Пархоменко И. Ю. О возможности аналитического определения структурной составляющей примеси золота в сульфидных минералах // Геохимия. 2001. № 9. С. 951 – 960.
13. Burg G. H. Natur des in den Pyriten nicht sichtbar enthaltenen Goldes // Zeitsch. pract. Geol. 1935. J. 43. H. 2. S. 17–26.
14. Cabri L. J., Newville M., Gordon R. A. Chemical speciation of gold in arsenopyrite // Can. Miner. 2000. V. 38. P. 1265–1281.
15. Cook N. J. and Chrysosoulis S. L. Concentrations of “invisible gold” in the common sulfides // Can. Miner. 1990. V. 28. P. 1–16.
16. Danyushevsky L., Robinson P., Gilbert S. et al. Routine quantitative multi-element analysis of sulphide minerals by laser ablation ICP-MS: standard development and consideration of matrix effects // Geochem., Explor. Environ. Anal. 2011. V. 11. P. 51–60.
17. Masslennikov V. V., Masslennikova S. P., Large R. R., Danyushevsky L. V. Study of trace element zonation in vent chimneys from the Silurian Yaman-Kasy volcanic-hosted massive sulphide deposit (Southern Urals, Russia) using laser ablation-inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICPMS) // Econ. Geol. 2009. V. 104. P. 1111–1141.
18. McClenaghan S., Lentz D. R., Martin J., Diegor J. Gold in the Brunswick No. 12 volcanogenic massive sulfide deposit, Bathurst Mining Camp, Canada: Evidence from bulk-ore analysis and laser-ablation ICP-MS data on sulfide phases // Mineral. Deposita, 2009. V. 44. 523–557.
19. Reich M., Deditius A., Chrysosoulis S., Li J. W., Ma C. Q., Parada M. A., Barra F., and Mittermayr F. Pyrite as a record of hydrothermal fluid evolution in a porphyry copper system: A SIMS/EMPA trace element study // Geochim. Cosmochim. Acta. 2013. V. 104, 42–62.
20. Reich M., Utsunomiya S., Kesler S. E., Wang L. M., Ewing R. C. and Becker U. () Thermal behaviour of metal nanoparticles in geologic materials // Geology. 2006. V. 34. P. 1033–1036.
21. Simon G., Huang H., Penner-Hahn J. E., Kesler S. E. and Kao L. -S. Oxidation state of gold and arsenic in gold-bearing arsenian pyrite // Am. Miner. 1999. V. 84. P. 1071–1079.
22. Vikentyev I. V. Precious metal and telluride mineralogy of large volcanic-hosted massive sulfide deposits in the Urals // Mineral. Petrol. 2006. V. 87. P. 305–326.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЛАТИНОСОДЕРЖАЩЕЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ В ДУНИТОВЫХ РУДАХ МЕТОДОМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО МИНЕРАЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

**Козлов А. П., Тимофеев А. С., Корнейчик О. Е.**

*ИПКОН РАН, г. Москва*

Для увеличения объема добычи платины в России весьма актуальным представляется вовлечение в эксплуатацию новых геолого-промышленных типов месторождений МПГ, среди которых наиболее значительным потенциалом обладают дунитовые руды зональных базит-ультрабазитовых комплексов, как коренные ис-

точники уникальных россыпных платиновых месторождений Урала, Алдана и Камчатки (рис. 1).

Технологические свойства продуктивного платинометального оруденения в различных массивах, несмотря на типоморфный генезис, могут иметь свои особенности, которые будут определять возможность использования и эф-



фективность применения тех или иных технологических методов при переработке платиносодержащих дунитовых руд. Для проведения количественной оценки и объективного сравнения основных технологических свойств платиносодержащей минерализации в различных зональных массивах использована система автоматизированного минералогического анализа (MLA). Система позволяет получать изображения и экспрессную информацию о составе большого количества зерен и частиц, а специальное про-

граммное обеспечение выдает количественные характеристики минерального и элементного состава продуктивной минерализации, размера зерен ценных компонентов, состава минеральных ассоциаций, наличия свободных частиц и сростков. Одним из основных преимуществ метода является экспрессное получение изображений и их высокое качество, которое достигается благодаря источнику электронов высокой яркости, системе высокоскоростного получения данных и полной автоматизации процесса.



Рис. 1. Платиноносные зональные базит-ультрабазитовые массивы России

Принцип работы системы MLA заключается в следующем. С помощью сканирующего электронного микроскопа проводится рентгенографический анализ поверхности исследуемой пробы в режиме измерения XBSE. Одновременно со сканированием поверхности проводится пошаговый точечный рентгеноспектральный анализ каждой минеральной фазы. Участки с близким элементным составом выделяются в отдельную фазу, окрашенную одним цветом. Далее составляется база данных минералов на основе полученных спектров и построение результирующего изображения классифицированных минеральных частиц (рис. 2). Представительность результатов полученных с помощью системы MLA обеспечивается значительным количеством изученных зерен и мономинеральных частиц.

Для проведения исследований использованы шашки с запрессованными зернами плати-

носодержащих минералов, которые были отобраны в процессе минералого-технологического опробования дунитов или дунитов с прожилками и шширами хромитов зональных базит-ультрабазитовых массивов Платиноносного пояса Урала (Нижнетагильский, Светлоборский, Вересовоборский, Каменушинский), Алданского нагорья (Кондер) и Корякско-Камчатского платиноносного пояса (Гальмознянский). Процесс выделения зерен с платиносодержащей минерализацией для проведения минералогических исследований заключался в следующем. Материал проб дробился до крупности – 2 мм, отмывался в воде, а затем обрабатывался в тяжелой жидкости. Из выделенных гравитационных концентратов при бинокулярном просмотре отбирались все зерна визуально похожие на платиноиды. Далее хвосты подвергались измельчению до крупности – 0,6 мм с последующим выделением тяжелого концен-

трата и дополнительным отбором зерен с платиносодержащими минералами. В работе также использованы выборки зерен платиноидов, отобран-

ные при шлиховом опробовании россыпных месторождений приуроченных к Гальмознанскому и Инаглинскому (Алданское нагорье) массивам.

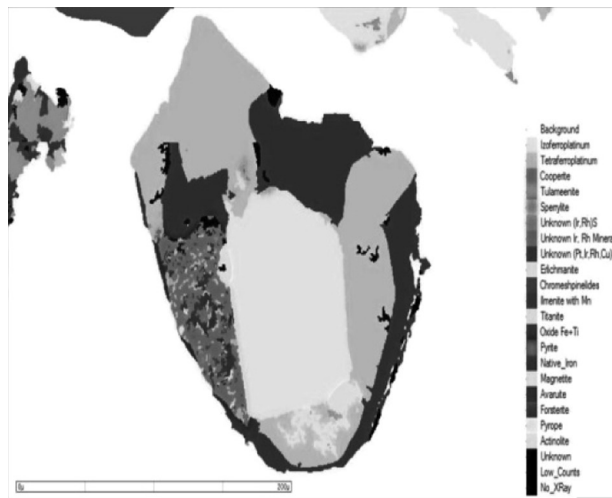
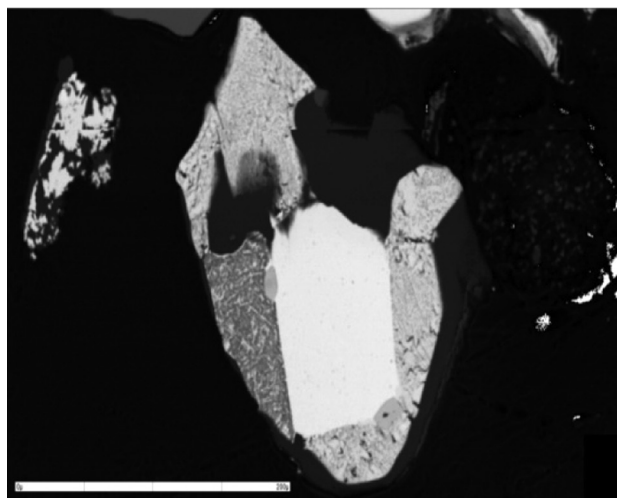


Рис. 2. Изображение зерна с платиносодержащими минералами:  
А – в отраженных электронах; Б – после обработки алгоритмом MLA

Автоматизированный минералогический анализ с помощью системы **MLA** проведен отдельно по каждой выборке в аналитической лаборатории Центра «Ресурсосберегающие технологии переработки минерального сырья» НИТУ «МИСиС» (оператор А. В. Панькин). Полученная информация обработана с помощью специального программного обеспечения. Это позволило получить: полный перечень обнаруженных в выборках рудных, породообразующих и платиносодержащих минералов (согласно существующей базе данных), графический и оцифрованный список всех изученных

зерен и составляющих их минеральных фаз, полную количественную характеристику состава платиносодержащей минерализации, гранулярный состав изученных зерен и присутствующих в них мономинеральных частиц платиноидов, количественное описание сростков и степени их вскрытия.

Суммарно в десяти выборках из семи представленных зональных массивов изучено около 25000 зерен платиноидов, в пределах которых выделено и проанализировано 160 тысяч частиц породообразующих, рудных и платиносодержащих минералов (табл. 1).

Таблица 1. Количество зерен с платиносодержащими минералами и мономинеральных частиц, установленных в выборках при проведении минералогических исследований методом MLA

Зональные массивы	Зерна с платиносодержащими минералами	Мономинеральные частицы
<b>Уральский платиноносный пояс</b>		
Нижнетагильский	1683	14156
Светлоборский 1 (с хромитом)	848	4364
Светлоборский 2	3362	13235
Вересовоборский	4167	26071
Каменушинский (с хромитом)	7198	27220
<b>Алданское нагорье</b>		
Инаглинский (россыпь)	1078	13128
Кондер (с хромитом)	1936	11326
<b>Корякско-Камчатский платиноносный пояс</b>		
Гальмознанский 1 (россыпь)	706	10970
Гальмознанский 2 (с хромитом)	1125	20369
Гальмознанский 3	2560	20064

В составе выделенной платиносодержащей минерализации во всех выборках, за исключением Нижнетагильского массива, доминиру-

ют платино-железистые сплавы, представленные изоферроплатиной ( $Pt_3Fe$ ) 34,8–91,0 мас. % и тетраферроплатиной ( $PtFe$ ) до 29,3 мас. % (табл. 2).

Значительным распространением в дунитовых рудах Урала и Камчатки пользуется туламинит ( $Pt_2FeCu$ ) до 39,3 мас. %, наличие ферроникельплатины ( $Pt_2NiFe$ ) 20,5 мас. % является характерной особенностью руд Нижнетагильского массива, в которых также установлено достаточно высокое (15,2 мас. %) содержание платино-медных сплавов переменного состава ( $Pt$ ,  $Cu$ ). Присутствие платино-медных сплавов также установлено в дунитовых рудах Вересовоборского и Гальмознанского массивов, 6,5 мас. % и 5,7 мас. % соответственно.

Повышенные концентрации сперрилита ( $PtAs_2$ ) установлены в дунитовых рудах Каменушинского (12,3 масс. %) и Гальмознанского (11,9 масс. %) массивов, для которых характерно наличие многочисленных хромитовых шпиров и прожилков. В подчиненном количестве в дунитовых рудах, как правило, находятся сульфиды и сульфидоарсениды МПГ до 7,4 масс. % и осмириды ( $Ir$ ,  $Os$ ) до 3,9 масс. %. Аномально высокие содержания этих минералов установлены в россыпях приуроченных к Инаглинскому массиву, 23,4 масс. % и 10,6 масс. % соответственно.

Таблица 2. Качественный и количественный состав платиносодержащей минерализации в выборках по данным MLA (мас. %)

Зональные массивы	Изоферроплатина	Тетраферроплатина	Туламинит	Ферроникельплатина	Платино-медные сплавы	Сперрилит	Сульфиды и сульфидоарсениды МПГ	Осмириды
Уральский платиноносный пояс								
Нижнетагильский	18,2	10,9	33,0	20,5	15,2	—	—	2,2
Светлоборский (с хромитом)	34,8	29,3	24,4	—	—	4,1	7,4	—
Светлоборский	52,2	24,8	17,9	—	—	0,5	3,8	0,8
Вересовоборский	56,8	14,4	22,2	—	6,5	—	—	—
Каменушинский (с хромитом)	54,2	28,4	—	—	—	12,3	1,3	3,8
Алданское нагорье								
Инаглинский (россыпь)	57,9	1,1	2,2	—	—	23,4	4,8	10,6
Кондер (с хромитом)	91,0	—	7,3	—	—	—	1,6	0,1
Корякско-Камчатский платиноносный пояс								
Гальмознанский (россыпь)	86,8	8,2	2,4	—	—	—	—	2,7
Гальмознанский (с хромитом)	44,2	—	39,3	—	—	11,9	0,6	3,9
Гальмознанский	40,1	13,0	36,6	—	5,7	2,4	1,1	1,2

Исследования гранулярного состава платиносодержащей минерализации показали, что в дунитовых рудах Урала, как правило, около половины зерен платиноидов находится в мелких и тонких классах крупности (–80 мкм) (табл. 3). Платиноиды характеризуются различной морфологией выделений. Так наиболее крупные индивиды имеют неправильную форму и часто находятся в сростании с оливином или хромшпинелидами, а значительная часть мелких зерен имеет кристаллическую форму с преобладанием кубической огранки. Максимальная крупность зерен не превышает 400 мкм, а средний размер зерен в выборках варьирует от 60 до 98 мкм. Исключение представляют руды Вересовоборского зонального массива, в которых 70 мас. % платиносодержащей минерализации находится в классах крупности +80 мкм и средний размер зерен составляет 129 мкм.

Для дунитовых руд Гальмознанского массива также характерным является преобладание мелких и тонких классов крупности (средняя круп-

ность зерен в выборке 83 мкм). Однако если дуниты содержат хромитовые шпиров и прожилки, то более 80 мас. % платиносодержащей минерализации находится в средних и крупных классах (+120 мкм) и средняя крупность зерен увеличивается до 210 мкм. Аналогичный гранулярный состав демонстрируют дунитовые руды (с хромитом) массива Кондер, в который средняя крупность зерен составляет 189 мкм.

Выборки по россыпям Инаглинского и Гальмознанского массива характеризуются максимальной средней крупностью зерен в выборках, 277 мкм и 325 мкм соответственно, с резким преобладанием в гранулярном составе продуктивной платиносодержащей минерализации в крупных классах (+200 мкм).

Изучение сростков и ассоциаций основных продуктивных минеральных фаз МПГ свидетельствует о том, что значительная часть изоферроплатины (42,1–82,2 мас. %) в дунитовых рудах зональных массивов Урала и Алдана находится в виде свободных зерен (табл. 4). Третья

часть зерен изоферроплатины находится в двойных сростаниях с тетраферроплатиной или туламинитом (до 47,6 мас. %), реже осмиридами или сульфидами и сульфоарсенидами МПГ.

Полиминеральные сростки изоферроплатины с прочими минералами МПГ характерны для дунитовых руд Светлоборского массива, где их количество составляет 20,9–22,5 мас. %.

Таблица 3. Гранулярный состав платиносодержащей минерализации в выборках по данным MLA (мас. %)

Зональные массивы	Средняя круп- ность зерен, мкм	Классы крупности, мкм							
		–10	–20+10	–40+20	–80+40	–120+80	–200+120	–400+200	+400
Уральский платиноносный пояс									
Нижнетагильский	95	0,08	0,17	3,61	<b>41,92</b>	23,05	20,89	10,28	–
Светлоборский 1 (с хромитом)	98	0,09	0,12	3,71	<b>45,59</b>	11,77	23,09	15,63	–
Светлоборский 2	79	0,02	0,21	4,16	<b>44,54</b>	20,95	23,15	6,10	0,87
Вересовоборский	129	0,27	0,29	2,16	<b>28,84</b>	17,17	<b>29,96</b>	18,20	3,09
Каменушинский (с хромитом)	60	0,14	0,92	<b>28,47</b>	<b>44,34</b>	10,86	10,74	4,53	–
Алданское нагорье									
Инаглинский (россыпь)	277	0,02	0,05	0,08	0,70	3,37	21,07	<b>58,95</b>	15,77
Кондер (с хромитом)	189	0,01	0,08	0,51	10,47	13,76	<b>33,30</b>	<b>37,80</b>	4,07
Корякско-Камчатский платиноносный пояс									
Гальмознанский 1 (россыпь)	325	0,07	0,19	0,80	3,66	4,87	15,75	<b>40,48</b>	<b>34,19</b>
Гальмознанский 2 (с хромитом)	210	–	0,15	0,90	7,46	10,74	<b>31,37</b>	<b>38,41</b>	10,97
Гальмознанский 3	83	0,56	2,76	23,81	<b>25,17</b>	11,48	15,64	20,58	–

Таблица 4. Распределение частиц изоферроплатины в сростках и ассоциациях по данным MLA (мас. %)

Зональные массивы	Средняя крупность частиц, мкм	Свободные зерна	Двойные сростки (минералы-спутники)	Полиминеральные сростки
<b>Уральский платиноносный пояс</b>				
Нижнетагильский	98	71,2	27,6 (туламинит; осмириды)	1,2
Светлоборский (с хромитом)	41	54,9	24,2 (тетраферроплатина; туламинит; сульфиды и сульфоарсениды МПГ)	20,9
Светлоборский	94	42,1	35,3 (тетраферроплатина)	22,5
Вересовоборский	238	52,4	47,6 (тетраферроплатина)	–
Каменушинский (с хромитом)	41	51,2	36,3 (тетраферроплатина)	12,5
<b>Алданское нагорье</b>				
Инаглинский (россыпь)	244	58,8	32,9 (тетраферроплатина)	8,3
Кондер (с хромитом)	197	82,2	14,6 (туламинит)	3,2
<b>Корякско-Камчатский платиноносный пояс</b>				
Гальмознанский (россыпь)	373	5,2	54,6 (тетраферроплатина)	40,2
Гальмознанский (с хромитом)	132	5,8	57,9 (туламинит)	36,3
Гальмознанский	83	7,7	50,7 (туламинит; тетраферроплатина)	41,6

Для дунитовых руд Гальмознанского массива характерным является незначительное количество изоферроплатины в свободных зернах (до 7,7 мас. %). В изученных выборках преобладают двойные сростания с тетраферроплатиной или туламинитом (50,7–57,9 мас. %) и полиминеральные сростки (36,3–41,6 мас. %).

Для тетраферроплатины типоморфными являются двойные сростания с изоферроплатиной (до 71,5 мас. %) и только для Нижнетагильского мас-

сива характерной является минеральная ассоциация с туламинитом (табл. 5). Наличие тетраферроплатины в свободных зернах характерно исключительно для дунитовых руд Урала, с максимальным содержанием в выборках Нижнетагильского (60 мас. %) и Каменушинского (49 мас. %) массивов. В полиминеральных сростках находится до 44,5 мас. % и 68,7 мас. % тетраферроплатины соответственно в выборках Светлоборского и Гальмознанского массива.



**Таблица 5. Распределение частиц тетраферроплатины в сростках и ассоциациях по данным MLA (мас. %)**

Зональные массивы	Средняя крупность частиц, мкм	Свободные зерна	Двойные сростки	Полиминеральные сростки
<b>Уральский платиноносный пояс</b>				
Нижнетагильский	166	60,0	36,2 (туламинит)	3,8
Светлоборский (с хромитом)	45	22,6	49,3 (изоферроплатина)	28,1
Светлоборский	94	12,5	42,7 (изоферроплатина)	44,7
Вересовоборский	98	27,4	71,5 (изоферроплатина)	1,1
Каменушинский (с хромитом)	49	49,0	35,3 (изоферроплатина)	15,7
<b>Алданское нагорье</b>				
Инаглинский (россыпь)	32	0,1	55,0 (изоферроплатина)	44,9
Кондер (с хромитом)	—	—	—	—
<b>Корякско-Камчатский платиноносный пояс</b>				
Гальмознанский (россыпь)	61	—	46,9 (изоферроплатина)	53,1
Гальмознанский (с хромитом)	—	—	—	—
Гальмознанский	28	1,8	29,6 (изоферроплатина)	68,7

В процессе минералогических исследований установлено, что кроме основных минералов дунитовых руд (хромшпинелидов и оливина), весьма распространенным рудным минералом в выборках Светлоборского, Вересовоборского и Гальмознанского массивов является магнетит (до 17,7 мас. %). Но только для руд Светлоборского

массива весьма характерным является наличие тесных сростаний магнетита с основными платиносодержащими минералами (табл. 6). До 31,9 мас. % магнетита ассоциирует с тетраферроплатиной; 14,1 мас. % с туламинитом; 9,3 мас. % и 6,9 мас. % соответственно с изоферроплатиной и сперрилитом.

**Таблица 6. Распределение частиц магнетита в сростках с платиносодержащими минералами по данным MLA (мас. %)**

Зональные массивы	Содержание в выборке (мас. %)	Средний размер частиц (мкм)	В сростках с платиносодержащими минералами (мас. %)			
			Изоферропла- тина	Тетраферропла- тина	Туламинит	Сперрилит
Уральский платиноносный пояс						
Нижнетагильский	0,3	50	—	—	0,1	—
Светлоборский (с хромитом)	9,0	65	0,8	15,6	4,1	—
Светлоборский	10,8	60	9,3	31,9	14,1	6,9
Вересовоборский	17,7	89	—	1,2	1,1	—
Каменушинский (с хромитом)	0,5	53	0,1	0,1	—	0,1
Алданское нагорье						
Инаглинский (россыпь)	0,8	122	—	—	—	0,1
Кондер (с хромитом)	0,1	24	—	—	0,1	—
Корякско-Камчатский платиноносный пояс						
Гальмознанский (россыпь)	4,0	45	1,0	1,3	—	—
Гальмознанский (с хромитом)	4,3	85	0,8	—	2,9	2,0
Гальмознанский	6,7	31	3,5	6,4	5,6	4,9

### Основные выводы

В процессе исследований платиносодержащей минерализации в дунитовых рудах зональных базит-ультрабазитовых массивов Урала, Алдана и Камчатки методом автоматизированного минералогического анализа подтверждено присутствие платины исключительно в собственных минеральных формах, доминирующими среди которых являются платино-железистые сплавы (изоферроплатина и тетраферроплатина). В связи с этим,

технологическая возможность производства платины из дунитовых руд должна рассматривать исключительно как извлечение установленной платиносодержащей минерализации.

Высокая плотность платиносодержащих минералов определяет возможность эффективного применения гравитационных методов. В соответствии с результатами детального изучения гранулярного состава платиносодержащей минерализации можно утверждать, что из дунитовых

руд Алдана и Камчатки, содержащих хромитовые включения, гравитационными методами может эффективно извлекаться до 90 % платины. Анализ распределения платиноидов по классам крупности в выборках из зональных массивов Урала свидетельствует, что при установленном гранулярном составе извлечение платины в гравитационные концентраты будет находиться на уровне 50 %.

Установленные тесные сростания парамагнитных минералов МПГ (изоферроплатина, сперриллит, осмиридий) с магнитными платиносодержащими минералами (тетраферроплатина, туламинит) и вторичным магнетитом создает

предпосылки для применения магнитной сепарации, что может позволить дополнительно выделить из хвостов гравитационного обогащения до 20 % платины.

Полученные результаты полностью подтверждаются результатами проведенных ранее минералого-технологических исследований [1–4] и позволяют рекомендовать использование метода автоматизированного минералогического анализа (MLA) для экспрессной оценки технологических свойств платиносодержащих дунитовых руд зональных базит-ультрабазитовых массивов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Козлов А. П., Чантурия В. А. Платиносодержащие дунитовые руды и их обогатимость. Москва: УРАН ИПКОН РАН, 2009. 148 с.
2. Козлов А. П. Минералого-технологическая характеристика россыпеобразующих платинометаллических руд зональных базит-ультрабазитовых комплексов // Горный информационно-аналитический бюллетень МГТУ, 2009, № 15, С. 529–539.
3. Козлов А. П., Матвеева Т. Н., Толстых Н. Д., Федотов К. В., Чантурия В. А. Разработка технологиче-

ских процессов извлечения платины из дунитов Платиноносного пояса Урала» // Журнал «Обогащение руд», 2013, № 5. С. 8–16.

4. Козлов А. П. Минералого-технологическая характеристика платиносодержащих дунитовых руд Среднего Урала // «Технологическая минералогия в оптимизации процессов рудоподготовки и обогащения минерального сырья». Сборник статей по материалам докладов VIII семинара по технологической минералогии. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2014, С. 66–72.

## ЗОЛОТО-СУЛЬФИДНЫЕ РУДЫ: ПРОБЛЕМА УПОРНОГО ЗОЛОТА

*Ожогин Д. О.*

*ФГУП «ВСЕГЕИ», Московский филиал, г. Москва, [ozhogindenis@yandex.ru](mailto:ozhogindenis@yandex.ru)*

Среди стратегических видов минерального сырья золото традиционно занимает лидирующее положение. Больше половины отечественных запасов золота сосредоточено в коренных месторождениях, с которыми в последнее десятилетие связаны основные перспективы его добычи. Промышленный интерес представляют золото-сульфидные, золото-сульфидно-кварцевые и золото-кварцевые руды. При этом, сегодня, как и сто лет назад, вопрос о форме нахождения тонкодисперсного золота в сульфидах остается дискуссионным и имеет практическое значение при создании современных технологий обогащения золото-сульфидных и золото-сульфидно-кварцевых руд. Необходимо отметить, что потери золота при обогащении этих руд до сих пор остаются весьма значительными, а сами руды относятся к категории труднообогатимых.

Вопрос о форме нахождения тонкодисперсного золота в сульфидах, которое сегодня тех-

нологи называют упорным, возник в середине XIX века, когда появились предположения о существовании «невидимого» золота в минералах. Сегодня, благодаря интенсивному внедрению в практику минералогических исследований прецизионных физических методов, существует несколько точек зрения о форме нахождения золота в сульфидных минералах. Большинство исследователей [1,5,6,7,11] основной формой нахождения тонкодисперсного золота в сульфидах считают самородное золото, присутствующее в виде самостоятельной фазы микро-нанометровой размерности. Наряду с самородным золотом рассматриваются и другие формы его нахождения. В работах ряда исследователей [3,8] доказывалось, что в пирите и арсенопирите золото может присутствовать в изоморфной форме. По мнению Н. С. Бортникова с соавторами [9], именно химически связанное золото играет существенную роль в его балансе в рудах.

Н. В. Петровская [11] считает, что тонкодисперсное золото в рудах распространено значительно шире, чем видимое (золото, диагностируемое методами оптической микроскопии). Оно присутствует не только во всех золоторудных месторождениях, но и в рудах других металлов, в которых видимое золото не встречается, а также рассеяно в гидротермально измененных породах. Поэтому, по ее мнению, изучение тонкодисперсного золота позволит решить кардинальный вопрос минералогии золота – об его форме нахождения (самородная форма, изоморфное вхождение в структуру минералов, сернистые соединения и др.).

Проведенные исследования золото-сульфидных и золото-сульфидно-кварцевых руд месторождений Сухой Лог, Маломырское, Пионерское, Албынское комплексом методов высокоразрешающей оптической и аналитической электронной микроскопии показали присутствие самородного золота преимущественно микро-нанометровой размерности. Самородное золото отмечается в рудах месторождений Олимпиада, Майское, Березовское и др. [2,4,10,12]. Самородное золото идентифицировано нами в комплексных уран-ванадиевых рудах Южной Карелии, урановых рудах Средней Азии и Казахстана, Царевского месторождения. Поэтому есть все основания считать, что золото в пирите и большей частью в арсенипирите присутствует в виде самостоятельной фазы.

Согласно классификации самородного золота по размерам частиц и скоплений Н. В. Петровской [11] к тонкодисперсному золоту относится коллоидно-дисперсное (менее 0,1 мкм), ультрадисперсное (0,1–1 мкм) и тонкодисперсное (1–10 мкм) золото, присутствующее в зернах и агрегатах минералов.

Прожилково-вкрапленные золото-сульфидные руды месторождений Сухой Лог и Маломырское имеют длительную историю развития. Современный облик руды приобрели в результате гидротермально-метасоматического процесса и последующих преобразований. Гидротермально-метасоматическая минерализация, являющаяся рудной, представлена рассеянной и гнездовидной вкрапленностью, прожилками разного вида и мощности, линзами сульфидов. Поэтому руды характеризуются сложным взаимоотношением слагающих их минеральных агрегатов, разновременными минеральными ассоциациями и генерациями рудных минералов, типом рас-

пределения в них самородного золота разного размера. При этом тонкодисперсное золото в рудах обоих месторождений главным образом связано с минералами второй продуктивной и третьей постпродуктивной (поздней) ассоциаций рудной стадии. Минеральные ассоциации характеризуются своеобразным текстурно-структурным рисунком, постоянным набором минералов с четкими индивидуальными чертами, присущими только им, температурными условиями образования, а также их возрастными и пространственными взаимоотношениями. Главным рудным минералом является пирит, с которым тесно ассоциирует золото.

В рудах месторождения Сухой Лог пирит II генерации имеет сложные кристалломорфологические формы (комбинация октаэдра и пентагон-додекаэдра) и микростроение (изогнуто – ступенчатый, прерывисто-волнистый рисунок пирамид). Пирит III генерации представлен преимущественно порфиробластическими выделениями, отличающимися микроступенчатым характером микростроения, многочисленными включениями рудообразующих минералов ранних минеральных парагенезисов. В пирите II преобладает самородное золото размером менее 10 мкм, а в пирите III генерации встречается только тонкодисперсное самородное золото. Золото в основном образует неравномерную вкрапленность в пирите. Форма золотинок пластинчатая, неправильная, размер варьирует от 0,05 до 6 мкм. Особо следует отметить выделения самородного золота глобулярно – ветвистого микростроения (рис. 1), обнаруженные между зернами пирита II генерации.

В рудах Маломырского месторождения пирит II и III генераций представлен порфиробластами сформированными кристаллами кубической, панидоморфной, реже пентагон-додекаэдрической формы. При этом кристаллы пирита III генерации имеют исключительно кубическую форму и нередко четко выраженную штриховку. В отличие от пирита II он в различной степени подвержен процессам окисления.

Золото в пирите II генерации приурочено в основном к границам зерен, микротрещинам, микродислокационным нарушениям, присутствует в виде индивидуализированных зерен размером от долей микрометров до 100 мкм. Отмечаются и более мелкие зерна округлой и изометричной формы, имеющие нанометрические размеры. Особо следует остановиться на локализации самородного золота на поверхности зерен пирита II. Как показали электронно-микроскопические исследова-

ния, на сколе зерен пирита фиксируются тончайшие округлые образования, нередко приобретающие подобие огранки (рис. 2). Как правило, вещество таких обособлений не извлекается на реплику. Однако в единичных случаях экстракции вещества устанавливается его неоднородность, выражающаяся в уплотнении внутренних частей, сложенных агрегатом сросшихся округлых индивидов, микроdifракционный анализ которых позволил отнести их к самородному золоту. На микроdifракционной картине золота с осью зоны  $[001]$  присутствует также несколько точечных отражений  $(111)$ . Иногда встречаются неравномерно распределенные агре-

гаты самородного золота, сформированные зернами кубической, реже округлой и слабо удлиненной формы, размер которых обычно варьирует в пределах 10–100 нм, тяготеющие к краевым зонам кристаллов пирита. Также отмечены единичные тончайшие пленочные образования самородного золота, размер которых составляет первые десятки нанометра. Содержание золота в пирите III генерации незначительно, присутствует оно преимущественно в виде округлых и изометричных зерен микрометровой размерности, локализующихся исключительно в краевых частях зерен пирита или в межзерновых пространствах.

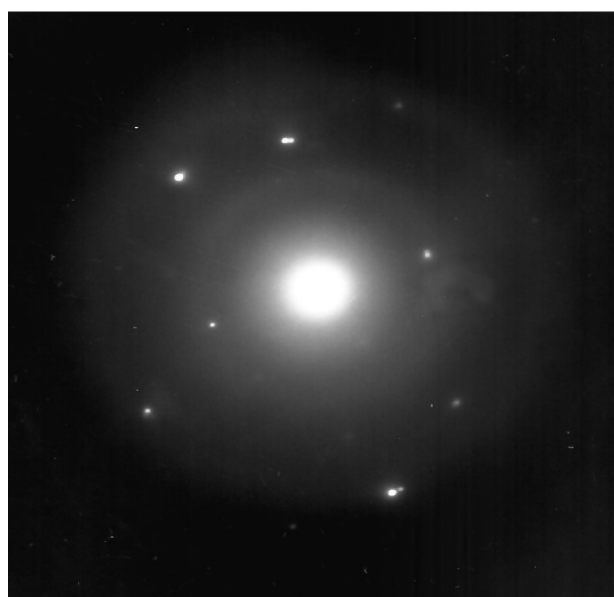
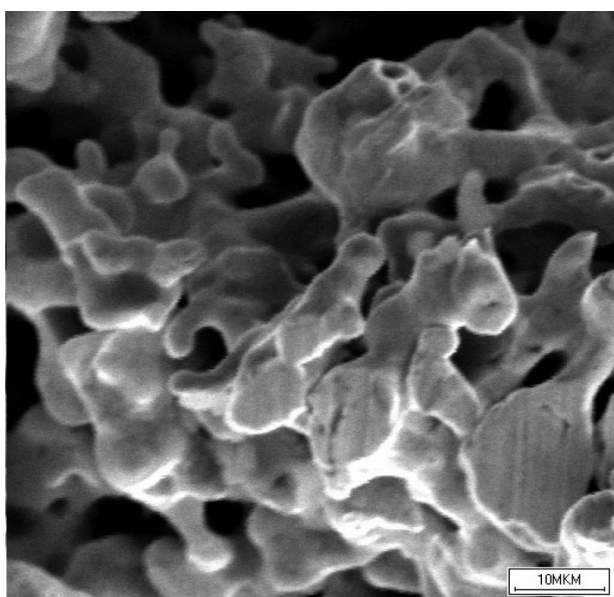


Рис. 1. Золото глобулярно-ветвистого микростроения. Реплика с поверхности скола зерна пирита. Микроdifракционная картина самородного золота с извлеченной на реплику частицы. ПЭМ

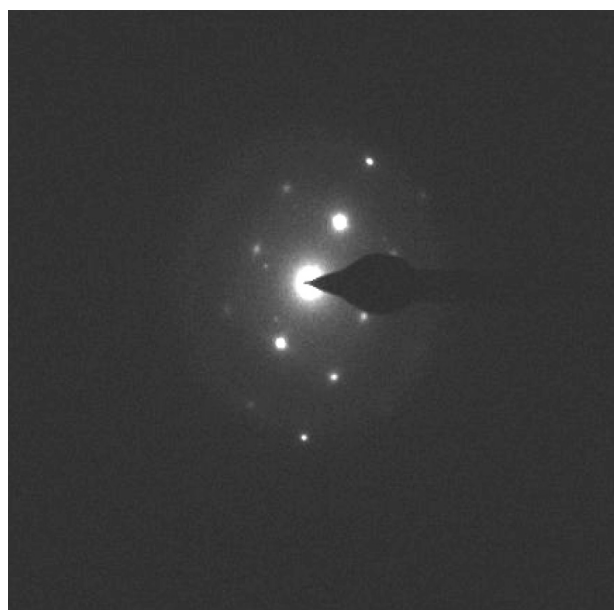
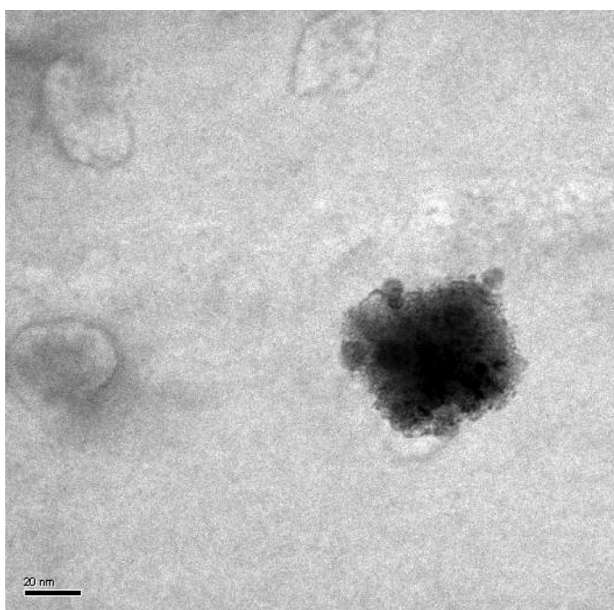


Рис. 2. Тончайшие округлые образования самородного золота. Реплика с поверхности скола зерна пирита. Монокристаллическая микроdifракционная картина самородного золота с извлеченной на реплику частицы. ПЭМ



Из вышеизложенного следует, что есть все основания относить к категории упорного золота тонкодисперсное самородное золото, ассоциирующее с сульфидами, прежде всего, пиритом. Извлечение упорного золота сопряжено с определенными трудностями, требует привлече-

ния дополнительных технологических операций (сверхтонкого измельчения, разрушения зерен пирита различными методами и т. д.). Поэтому наиболее перспективными сегодня следует считать комбинированные технологии, предусматривающие биохимическое выщелачивание.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Вахрушев В. А. Минералогия, геохимия и образование месторождений скарново-золоторудной формации. Новосибирск. Наука. 1972. 238 с.
2. Вологин В. Г., Житинев Н. Н., Буланова Н. Ф. Минерально-сырьевой комплекс Дальневосточного ФО // Разведка и охрана недр. 2008. № 9. С. 42–43.
3. Золотоносный арсенопирит и условия его образования на золоторудных месторождениях Олимпиада и Ведуга (Енисейский кряж, Сибирь) / А. Д. Генкин, Ф. Е. Вагнер., Т. Л. Крылова и др. // Геология рудных месторождений. 2002. Т. 44. № 1. С. 59–76.
4. Использование комплекса минералого-аналитических методов при оценке эффективности биогидрометаллургической технологии переработки труднообогатимых золотосодержащих руд / В. Т. Дубинчук, Д. Х. Ким, Н. Н. Кривошеков и др. // Руды и металлы. 2007. № 1. С. 60–69.
5. Конеев Р. И. Наноминералогия золота эпитеpmальных месторождений Чаткало-Кураминского региона (Узбекистан). СПб.: Делта. 2006. 218 с.
6. Микросферулы самородного золота, сульфидов и сульфосолей в золотых рудах / М. И. Новгородова, Г. Н. Гамянин, Ю. Я. Жданов и др. // Геохимия. 2004. № 2. С. 160–172.
7. Моисеенко В. Г. Нанозолото в природе и эксперименте // Минералогическая интервенция в микро – и наномир. Материалы международного минералогического семинара. Сыктывкар. 2009. 53–58.
8. Невидимое золото в сульфидах из современных подводных гидротермальных построек / Н. С. Бортников, Л. Кабри, И. В. Викентьев и др. // Доклады РАН. 2000. Т. 372. № 6. С. 804–807.
9. Невидимое золото в сульфидах субмаринных колчеданных построек / Н. С. Бортников, Л. Кабри, И. В. Викентьев и др. // Геология рудных месторождений. 2003. Т. 45. № 3. С. 228–240.
10. Ожогин Д. О. Роль аналитической электронной микроскопии при технологической оценке минерального сырья // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2008. № 7. С. 391–396.
11. Петровская Н. В. Самородное золото (общая характеристика, типоморфизм, вопросы генезиса). М.: Наука. 1973. 347 с.
12. Пискунов Ю. Г. Рогулина Л. И., Юшманов Ю. П. Минералогия Майского золото-серебряного месторождения (Приморье) // Тихоокеанская геология. 2006. Т. 25. № 1. С. 74–80.

## ПОВЕДЕНИЕ ПЕРОВСКИТА В ПРОЦЕССЕ ГИДРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПЕРЕДЕЛА

*Лихникевич Е. Г., Соколов С. В.*

*ФГУП «ВИМС им. Н. М. Федоровского», г. Москва; vims-rentgen@mail.ru*

Титан, потребность в котором в мире с каждым годом возрастает, широко применяется в разных областях промышленности. Титановые руды шести крупнейших месторождений РФ, на которые приходится почти 90 % учтенных запасов этого элемента, относятся к следующим минеральным типам: ильменит-титаномagnetитовый (преобладает), апатит-ильменит-титаномagnetитовый, лейкоксен-кварцевый и титаномagnetитовый. Эти типы руд представляют основную промышленную ценность, но ни одно из месторождений титана до сих пор не достигло стадии промышленного освоения [3]. Добыча титанового сырья

ведется только на Ловозерском лопаритовом месторождении, где попутно с ниобием и редкоземельными элементами получают лопаритовый концентрат, содержащий 38–44 мас. % диоксида титана. [2].

Значительным резервом увеличения добычи титана и сопутствующих полезных металлов могут стать их нетрадиционные источники. На повестке дня стоит задача освоения титановых месторождений с нетрадиционными типами руд, которые ранее не использовались в промышленности, – например, таких, где главным рудным минералом является перовскит [4]. При этом счи-

тается, что эти руды зачастую являются низкокачественными и к тому же труднообогатимыми в связи с технологическими сложностями передела перовскитовых концентратов.

Интерес к перовскиту, как титановому сырью, заметно возрос в связи с открытием в Америке его крупных месторождений, на рудах которых достигнуты очень высокие показатели извлечения титана, ниобия и редких земель.

К числу наиболее перспективных объектов, в рудах которого совместно присутствуют перовскит и титаномагнетит, можно отнести месторождение Африканда на Кольском полуострове, являющееся одним из крупнейших по ресурсам титана в РФ. Это месторождение следует рассматривать как комплексное, т. к. его руды, наряду с титаном и железом, содержат редкие (ниобий, тантал) и редкоземельные элементы, концентратом которых является перовскит.

Вовлечение в промышленное освоение нетрадиционных источников сырья требует во многих случаях применения в процессах технологии передела руд новых нестандартных решений при условии их достаточно высокой экономической эффективности и экологической безопасности. Таким образом, задача технологических исследований состоит в повышении извлечения перовскита в концентрат за счет интенсификации процессов флотации на основе использования современных селективных флотационных реагентов.

Объектом нашего исследования являлась технологическая проба титаномагнетит-перовскитовой руды месторождения Африканда. Слагающий пробу каменный материал характеризуется разномасштабными структурами, среди которых чаще встречаются средне- и мелкозернистые разновидности. При скоплении крупных кристаллов титаномагне-

тита руда приобретает крупнозернистое строение, а анхимономинеральным перовскитовым агрегатам присущи тонко-мелкозернистые структуры. При этом в обоих случаях текстуры руды массивные. Однако наиболее часто встречаются такситовые (пятнистые и пятнисто-полосчатые) разновидности текстур.

Главными компонентами изученной пробы являются видообразующие для рудных минералов оксиды (мас. %):  $\text{TiO}_2$  37,5,  $\text{CaO}$  27,5,  $\text{FeO}_{\text{общ}}$  10,91. Отметим, что в ее составе обнаружены повышенные содержания ниобия (0,97 %), тантала (0,040 %), редких земель цериевой группы (3,73 %) и тория (0,062 %), которые концентрируются преимущественно в перовските.

Руда относится к титаномагнетит-перовскитовому технологическому типу, характеризуется резким преобладанием перовскита над титаномагнетитом (65 % и 7 %, соответственно) и сложным полиминеральным составом:  $\text{Fe}$ -паргасит (9,5 %), титанит (5 %), кальцит (4 %), диопсид (3 %), биотит-флогопитовые слюды и пектолит (по 2 %).

**Перовскит** имеет разнообразные формы выделений и сильно варьирует по величине кристаллов и зёрен. Идиоморфные кристаллы перовскита размером от 0,1 до 1–1,5 см в поперечнике встречаются в пустотах рудной массы или приурочены к гнёздам кальцита (рис. 1). Минерал нередко образует полосчатые обособления тонковкрапленных зернистых агрегатов (рис. 2 – левый), но наибольшим распространением пользуется перовскит, слагающий гнёздообразные скопления и даже целые участки как в ассоциации с  $\text{Ti}$ -магнетитом, так и мономинеральные (рис. 2 – центр и правый). Такие скопления с размерами от 5–7 до 12–15 см концентрируют основную массу перовскита в рудной пробе.

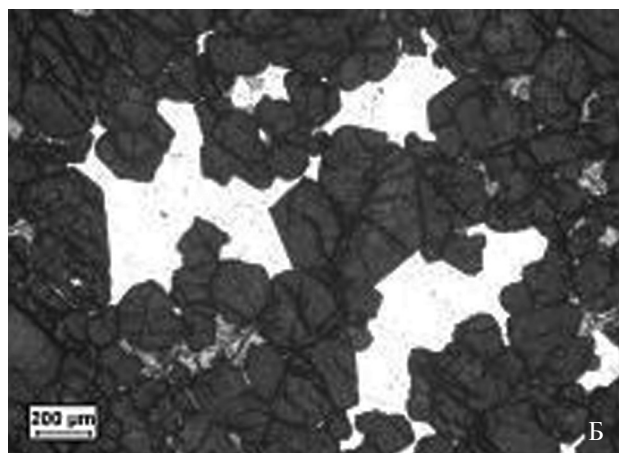
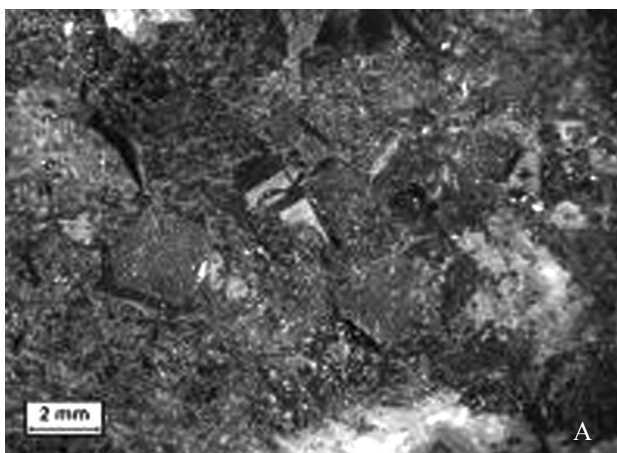


Рис. 1. А – субкубические кристаллы перовскита; Б – идиоморфные кристаллы перовскита в кальцитовом агрегате

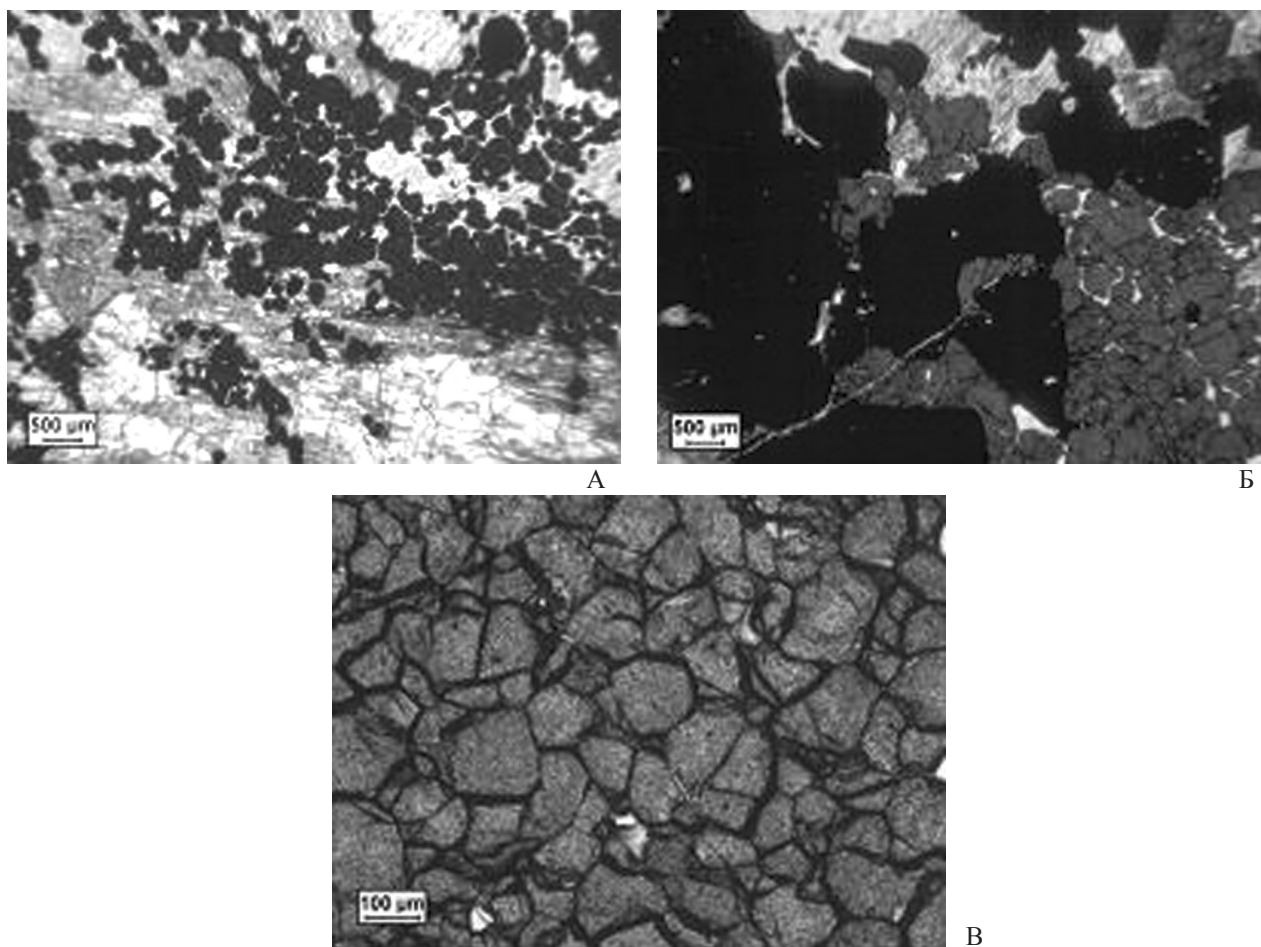


Рис. 2. А – вкрапленный перовскит в ассоциации с кальцитом и амфиболом;  
Б – выделения Ti-магнетита (черное) в мелкозернистом агрегате зёрен перовскита;  
В – анхимономинеральное скопление перовскита равномернoзернистой структуры.

Гранулярный состав перовскита был изучен оптико-геометрическим методом [1] на типичной разновидности руды, представленной анхимономинеральным, достаточно равномернoзернистым агрегатом из более 3000 зёрен перовскита. Практически все они обладают изометрично-округлым обликом (коэффициент изрезанности 0,98). Почти 73 % зерен по размеру попадает в интервал  $-0,25+0,07$  мм, 23 % зерен относятся к тонким и весьма тонким классам ( $-0,071+0$  мм), а на более крупный материал ( $-1+0,25$  мм) приходится всего около 5 % их общего количества.

Химический состав перовскита изучался на рентгеноспектральном микроанализаторе Jeol JXA-8100 (Япония, Jeol Ltd.), оснащённом энергодисперсионным и тремя кристаллдифракционными спектрометрами. Согласно полученным результатам, минералы группы перовскита содержат (мас. %): 44,3–57,8  $\text{TiO}_2$ , 0,6–1,4  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 6,9–38,9  $\text{CaO}$ , 0,13–4,9  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ , 1,4–34,3  $\text{REE}_2\text{O}_3$  цериевой группы и 0,00–1,56  $\text{ThO}_2$ .

**Характеристика перовскитового концентрата.** Для получения перовскитового концентрата использовался максимально обогащённый этим минералом класс крупности  $-0,2+0$  мм немагнитной фракции. Процесс флотационного обогащения осуществлялся в двух режимах: без предварительного отделения кальцита и после его отделения. Минеральный состав полученных продуктов, определённый рентгенографическим и оптико-минералогическим анализами, представлен в табл. 1.

Для продукта 15/6, показавшего более высокое содержание перовскита, был определен химический состав (табл. 2). Содержание  $\text{TiO}_2$  в этом концентрате, равное 51,1 мас. %, обеспечивается в первую очередь перовскитом (83 мас. %). Однако, часть этого титана связана с титанитом, на долю которого в концентрате приходится всего 5 мас. %. Расчет, проведенный по реально установленным количествам диоксида титана в этих минералах, показал, что вклад титанита не превышает двух мас. %.

По сравнению с исходной рудой, в перовскитовом концентрате установлены повышенные содержания попутных полезных элементов (1,40 % Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 0,064 % Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, почти 6 % легких REE<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), а также зафиксирован рост количества Th до 0,086 %.

Для переработки перовскитового концентрата был использован наиболее перспективный способ автоклавного вскрытия перовски-

та растворами азотной кислоты, т. к. этот способ обеспечивает селекцию титана от кальция, железа, ниобия и редкоземельных элементов. Образующиеся при разложении перовскита соли азотной кислоты могут быть эффективно использованы как удобрения в сельском хозяйстве, а извлечение редкоземельных элементов из азотнокислого раствора можно проводить по промышленной технологии.

Таблица 1. Минеральный состав перовскитовых концентратов

Минерал Образец	Содержание, мас. %	
	Продукт 15/6	Продукт 16/10
Перовскит CaTiO <sub>3</sub>	83	81
Титанит CaTiSiO <sub>5</sub>	5	5,5
Роговая обманка NaCa <sub>2</sub> (Mg,Fe,Al) <sub>3</sub> [Al <sub>2</sub> Si <sub>6</sub> O <sub>22</sub> ](OH) <sub>2</sub>	5	3,5
Диопсид Ca(Mg,Fe)[Si <sub>2</sub> O <sub>6</sub> ]	4	5
Кальцит CaCO <sub>3</sub>	1	4
Гётит FeO(OH)	1	–
Сумма	99,0	99,0

Таблица 2. Химический состав перовскитового концентрата (продукт 15/6)

Компоненты	Содержание, мас. %	Компоненты	Содержание, мас. %
SiO <sub>2</sub>	4,45	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,064
TiO <sub>2</sub>	51,10	ZrO <sub>2</sub>	0,059
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,64	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,25
Feобщ	1,92	Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,97
MgO	0,87	Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,32
CaO	34,0	Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,44
SrO	0,29	Y	0,025
Na <sub>2</sub> O	0,068	Th	0,086
K <sub>2</sub> O	0,048	U	0,014
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,086	Собщ	<0,10
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1,40	ППП	0,11

В процессе автоклавной обработки перовскитового концентрата растворами азотной кислоты варьировали основные технологические показатели (температура, продолжительность процесса, концентрация кислоты). Температура изменя-

лась в пределах 140–160°C, продолжительность выщелачивания – от 1 до 4-х часов, концентрация HNO<sub>3</sub> – от 40 до 57 %; отношение Т: Ж было постоянным. Данные экспериментальных исследований содержатся в таблице 3.

Таблица 3. Результаты переработки перовскитового концентрата

Условия опыта	Выход кека, %	Компоненты						
		TiO <sub>2</sub>	CaO	Σ REE <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ThO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Исходный концентрат (мас. %)		51,1	34,0	5,98	0,086	2,75	1,40	0,064
Автоклавное выщелачивание: 40 % HNO <sub>3</sub> , t=140°C, τ=1ч	90,0	<u>34,39*</u> 39,43	<u>22,48</u> 40,5	<u>0,54</u> 72,07	<u>0,043</u> 55,13	<u>2,46</u> 19,62	<u>0,69</u> 55,8	<u>0,0607</u> 14,53
Автоклавное выщелачивание: 57 % HNO <sub>3</sub> , t=140°C, τ=1ч	87,6	<u>35,46</u> 39,21	<u>22,85</u> 41,13	<u>0,39</u> 80,36	<u>0,044</u> 55,2	<u>2,59</u> 17,43	<u>0,71</u> 55,58	<u>0,084</u> 14,98
Автоклавное выщелачивание: 57 % HNO <sub>3</sub> , t=140°C, τ=2ч	50,0	<u>71,61</u> 29,93	<u>7,75</u> 88,6	<u>0,29</u> 91,67	<u>0,033</u> 80,81	<u>4,159</u> 24,38	<u>1,757</u> 37,25	<u>0,102</u> 20,31
Автоклавное выщелачивание: 57 % HNO <sub>3</sub> , t=160°C, τ=2ч	70,4	<u>61,96</u> 14,64	<u>6,11</u> 99,82	<u>0,30</u> 87,86	<u>0,026</u> 78,72	<u>3,57</u> 8,60	<u>1,359</u> 31,66	<u>0,074</u> 18,06
Автоклавное выщелачивание: 57 % HNO <sub>3</sub> , t=160°C, τ=4	56,0	<u>90,12</u> 1,24	<u>1,85</u> 96,95	<u>0,05</u> 98,39	<u>0,012</u> 99,75	<u>4,14</u> 15,69	<u>1,81</u> 27,6	<u>0,10</u> 12,50



Результаты рентгенографического анализа образцов кеков автоклавного азотнокислотного вскрытия перовскитового концентрата приведены в таблице 4.

Как видно из представленных в таблицах 3 и 4 данных экспериментальных исследований и результатов рентгенографического анализа образцов кеков автоклавного азотнокислотного вскрытия перовскитового концентрата, при температуре

160°C и продолжительности выщелачивания в течение четырех часов 57 %-ым раствором кислоты перовскит практически полностью разлагается. При этом **Ti, Ta, Nb и Fe остаются в нерастворимом остатке**, а в раствор переходит основная масса редкоземельных элементов, кальция и тория.

На рисунке 3 представлена принципиальная технологическая схема передела перовскитового концентрата Африкандского месторождения.

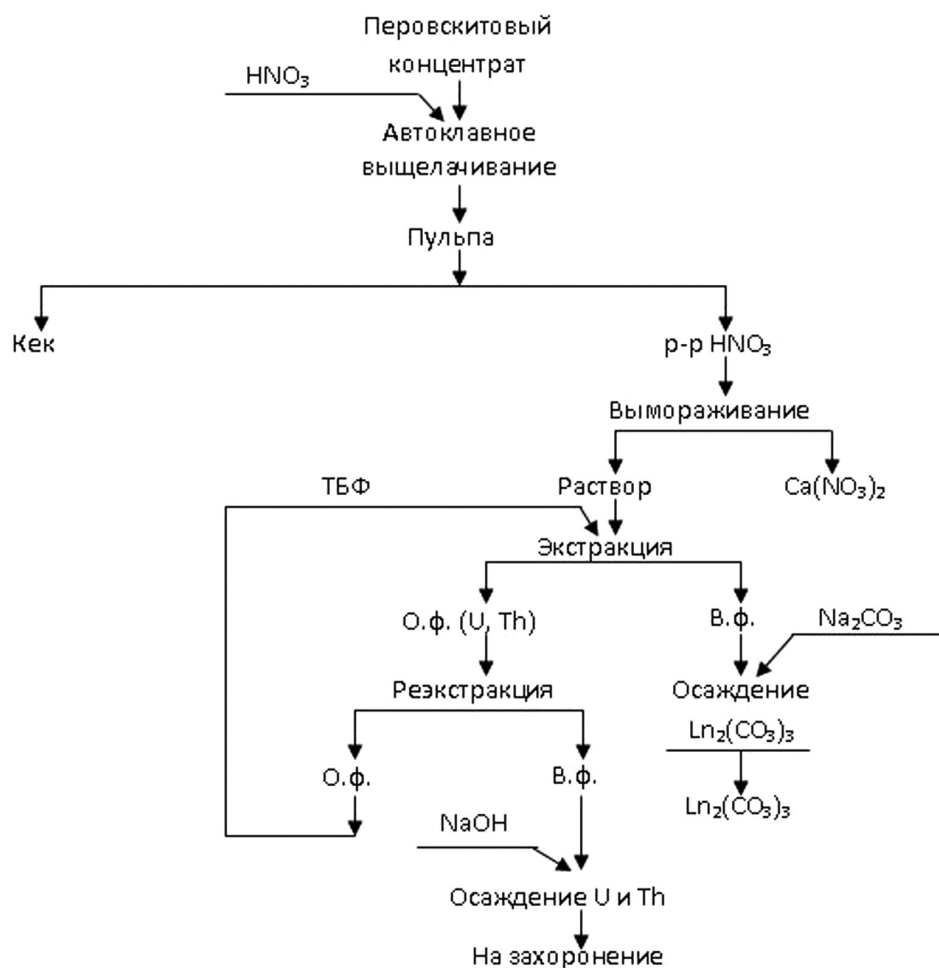


Рис. 3. Принципиальная азотнокислотная схема переработки перовскитового концентрата.

О. ф. – органическая фаза, В. ф. – водная фаза

Таблица 4. Минеральный состав кеков по данным рентгенографического анализа (мас. %)

Минерал	Л-1	Л-2	Л-3	Л-4
Перовскит	47	16	15	3
Амфибол (Fe-паргасит)	14	2–3	4	4
Диопсид	10	4,5	3	<1
Титанит	<1	–	–	–
Кальцит	–	–	0,5	–
Рутил	5–10	70	65,5	73
Анагаз	8	7	5	6
Брукит	–	–	6	10
Сумма	90	100	100	97

Таким образом, для переработки перовскитового концентрата, содержащего 51,1 %  $\text{TiO}_2$ , 5,98 %  $\text{REE}_2\text{O}_3$  и 0,086 %  $\text{ThO}_2$ , предложена технологическая схема, которая обеспечивает комплексное получение диоксида титана, редких земель и кальциевой селитры. Основными операциями схемы являются автоклавное азотнокислотное вскрытие перовскита, дезактивация раствора и выделение из него редкоземельных карбонатов.

Извлечение титана в конечную продукцию при выходе 56–62 % составляет более 98 %. Редкоземельные элементы и торий практически полностью переходят в азотнокислый раствор, при этом извлечение  $\text{REE}_2\text{O}_3$  превышает 98 %, а карбонатов редких земель равняется 98 %. Выход ториевого продукта от руды – 0,035 %, содержание  $\text{ThO}_2$  в нем – 78 %. Выход кальциевой селитры из раствора – 92,4 %.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гранулометрический анализ объектов в микрооптических препаратах на основе компьютерных технологий с использованием анализатора изображений. Методическая инструкция № 49. Москва: ВИМС, 1999, 15 с.
2. О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2010 году. Титан. М., 2011, 418 с.
3. Прогнозно-геологические модели месторождений и их прикладное значение (черные, цветные, ле-

гирующие металлы и нерудное сырьё) // Минеральное сырьё. Серия методическая, № 3. Титан. Москва: Изд-во ВИМС, 2007, 49 с.

4. Тигунов Л. П., Быховский Л. З., Зубков Л. Б. Титановые руды России: состояние и перспективы освоения // Минеральное сырьё. Серия геолого-экономическая, № 17. Москва: Изд-во ВИМС, 2005, 104 с.

## НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПОТЕНЦИАЛА КВАРЦА ИЗ ТЕХНОГЕННЫХ ОТВАЛОВ СЛЮДОНОСНЫХ ПЕГМАТИТОВ (КАРЕЛИЯ)

*Скамницкая<sup>1</sup> Л. С., Бубнова<sup>1</sup> Т. П., Дубинчук<sup>2</sup> В. Т., Раков<sup>3</sup> Л. Т.*

*<sup>1</sup> ИГ КарНЦ РАН, г. Петрозаводск, <sup>2</sup> ФГУП «ВИМС им. Н. М. Федоровского», г. Москва, <sup>3</sup> ИГЕМ РАН, г. Москва*

Кварц и в XXI веке остается промышленным минералом, спрос на который увеличивается и не ликвидирован дефицит особо (или высоко) чистого кварца [1]. Важная проблема заключена в том, что даже из условно высококачественного сырья современными технологическими способами не всегда удастся получить концентраты, соответствующие возросшим требованиям потребителей. Результаты исследований последних лет с акцентом на оценку нетрадиционного кварцевого сырья Карелии позволяют утверждать, что присутствуют все аргументы к научно обоснованию нового перспективного региона России. Важная роль отведена оценке кварца из техногенных отвалов.

На территории Российской Федерации к концу XX века было складировано около 90 млрд. тонн пород и отходов горного производства. На территории Карелии техногенные отвалы с кварцем представлены отвалами слюдодобычи бывшего ГОКа «Карелслюда» [2]. Месторождения

слюдоносных пегматитов Карелии интенсивно разрабатывалось с начала 30-х годов XX века. За период работы шахт здесь сформировались огромные отвалы жильной массы и вмещающих пегматиты пород. В настоящее время техногенные отвалы бывшего ГОКа «Карелслюда» представляют собой геометрически не конкретизированную, с недоизученной минеральной характеристикой, произвольную смесь из кварца, полевых шпатов, слюд и продуктов (отходов) добычи и переработки мусковита, зачастую перемешанную с породами сопутствующей или последующей вскрыши и «засоренную» отходами производственной деятельности.

Наиболее крупные по объему отвалы образовались на месторождениях Плотина и Малиновая Варакка. Важной специфической особенностью месторождения Плотина, отличающей его от других месторождений, таких как Малиновая Варакка и Тэдино, является значительное проявление в некоторых жилах

поздних процессов, характерных для мусковит-редкометалльных пегматитов. На месторождении Плотина основной объем добычи прихо-

дился на главную жильную зону из выработок шахты «Капитальная», определившую минеральный состав отвалов (рис. 1).



а



б



в



г



д



е

Рис. 1. Фото отвалов рудников: а, б, в – Малиновая Варакка, г, д, е – Плотина

Отработка месторождений Чупино-Лоухской группы на мусковит в 1991 году была прекращена.

При работе ГОКа «Карелслюда» из добытой жильной массы выбирался не только промышленный мусковит, но и кварц-полевошпатовое сырье. В начальный период эксплуатации месторождения оставшаяся после извлечения мусковита жильная масса частично поступала на поверхность и складировалась в отвалы, частично использовалась для закладки выработанного пространства. После

строительства на месторождениях рудосортировочных цехов, вся жильная масса, после выборки забойного сырца, подавалась на классификацию по классу 20 мм, крупная жильная масса (>20мм) подвергалась на транспортной ленте ручной выборке микроклина, кварца и мусковита, а фракция <20 мм складировалась в отвалы.

Проведенное обследование и опробование отвалов показало наличие и более крупных кусков, что видно из рис. 1 и 2.



а



б

Рис. 2. Кварц из буртов на отвалах рудников а – Плотина, б – Малиновая Варакка

Молочно-белый кварц из техногенных отвалов слюдяных пегматитов изучен на примере рудников Плотина, Малиновая Варакка. Отвалы рудника Тэдино измельчены и отработаны на мусковит. На отвалах месторождений присутствуют бурты предварительно отсортированного кварца, представленные серым и молочно-белым кварцем с поверхностным ожелезнением. В незначи-

тельных количествах присутствует кварц со слабой светло-розовой окраской, без видимой минерализации и сильного ожелезнения. Размер кусков колеблется в широких пределах от 2–5 см до 20 см и более (рис. 2).

Характеристика наиболее крупных отвалов слюдяных пегматитов рудников Плотина и Малиновая Варакка приведена в таблице 1.

Таблица 1. Характеристика наиболее крупных отвалов рудника Плотина и Малиновая Варакка

Рудник	Отвалы	Объем отвала, м <sup>3</sup>	Площадь, м <sup>2</sup>	Средняя мощность, м	Содержание кварца крупностью, %	
					>10 мм	<10 мм
Плотина	ПО-22	326800	38000	8,6	8,02	7,04
	ПО-23	58650	9775	6,0	1,75	5,3
Малиновая Варакка	МО-1	53916	4413	6,0	0,11	6,8
	МО-3	6650	5700	3,9	11,3	6,4
	МО-4	16800	4000	4,2	3,33	11,96

Для определения потенциала кварца из отвалов отобранные пробы кварца изучены с использованием оптической и электронной микроскопии. Электронно-микроскопическое и микронзондовое изучение кварцев проведено на сканирующем электронном микроскопе VEGA II LSH (Tescan) с энергодисперсионным анализатором INCA Energy 350.

Анализ гранулометрического и минерального составов проб из отвалов показал, что на отвалах

рудника Малиновая Варакка преобладают крупные фракции, представленные в основном вмещающими породами и мелкие (менее 2 мм), в составе которых сосредоточены кварц, мусковит, микроклин и сростки кварца с полевыми шпатами (рис. 3). Кварц в отвалах рудника Малиновая Варакка в основном серый, загрязненный. Вероятно, чистый молочно-белый кварц отобран в процессе сортировки и позднее в процессе работы кварцевого цеха.

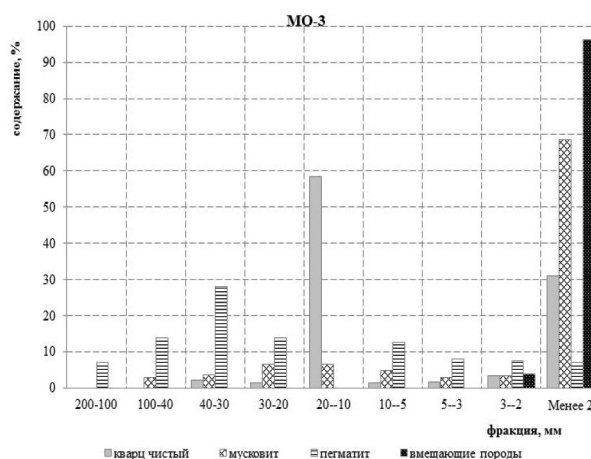
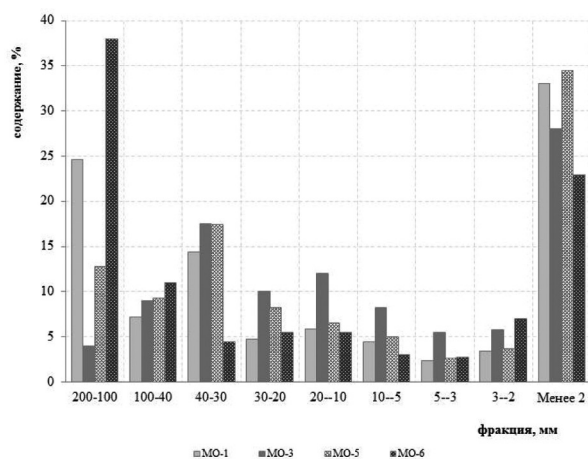


Рис. 3. Гранулометрический состав горной массы и распределение минералов в отвале рудника Малиновая Варакка

В отвалах рудника Плотина кварц более крупный, мусковит в крупных фракциях присутствует в небольших количествах, увеличиваясь в классе менее 20 мм.

В гнейсовой части породного отвала ПО-22 преобладают вмещающие породы, 75 % которых сосредоточены в классе крупнее 40 мм (рис 4).

По результатам петрографического изучения установлено, что кварц в отвалах рудника Малиновая Варакка однотипный, структура его гранобластовая, зубчатая, неравновесная. Зерна кварца неправильной формы, некоторые слегка вытянутые. Размер зерен кварца варьирует от 0,1 до 6,5 мм. Мелкие зерна наблюдаются часто на границах крупных зерен или внутри крупных



зерен вблизи границ (реликтовые участки зерен с одинаковым погасанием) [3]. Элементы ли-

нейной блочности в кварце и развитие позднего мелкозернистого кварца отражены на рисунке 5.

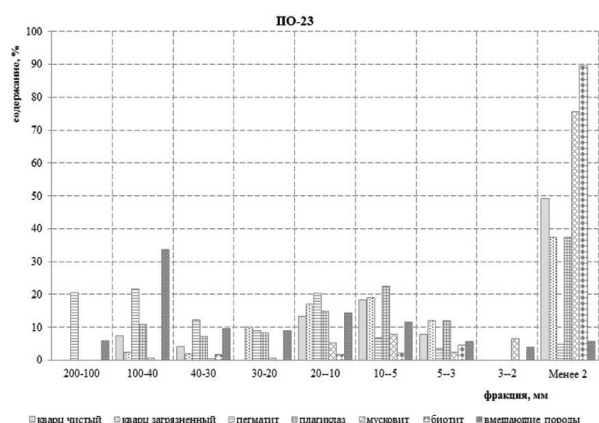
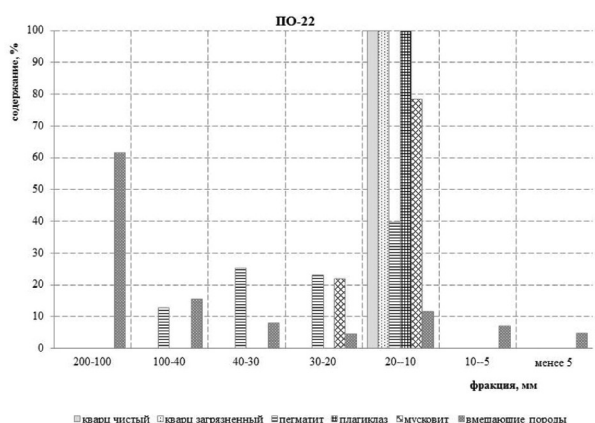
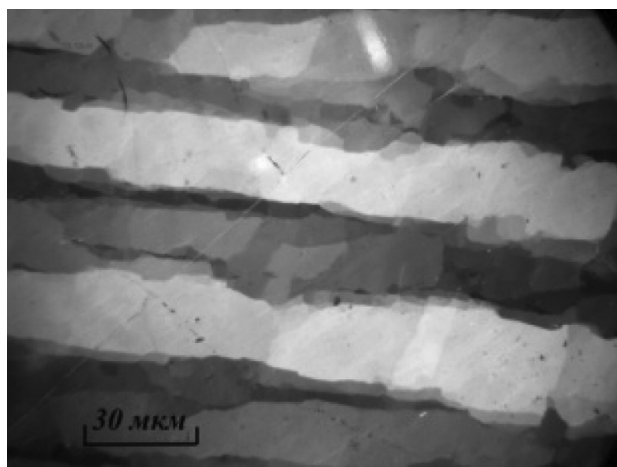
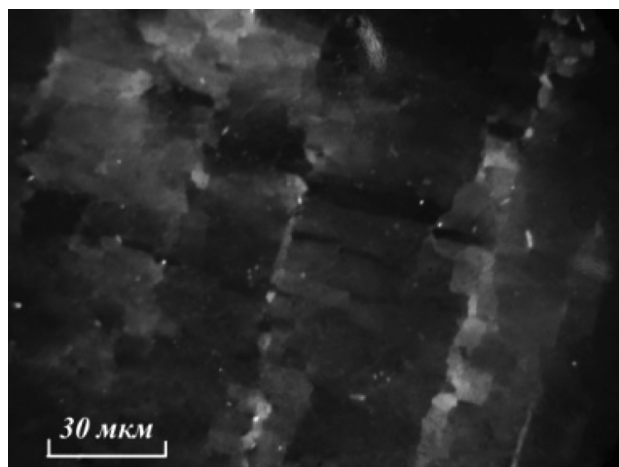


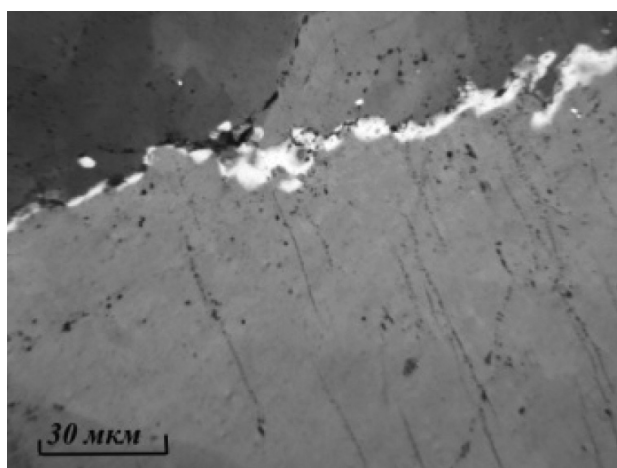
Рис. 4. Гранулометрия и распределение минералов в горной массе отвалов рудника Плотина



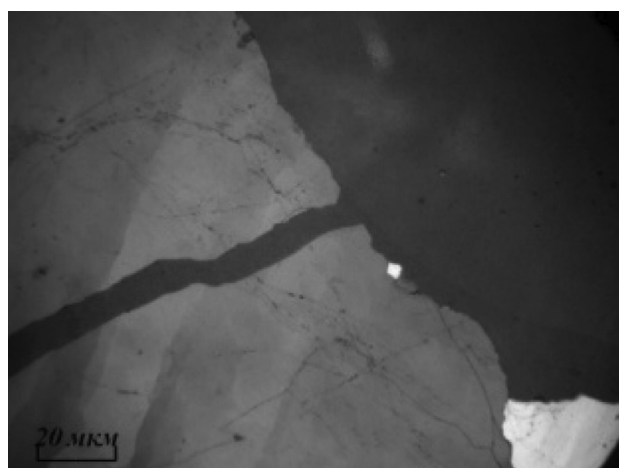
а



б



в



г

Рис. 5. Структурные особенности кварца из отвалов рудника Малиновая Варакка:  
а, б – элементы линейной блочности; в, г – разнозернистый кварц двух генераций (фото шлифов)

Размеры минеральных включений в кварце не превышают 0,45×0,22; 0,22×0,32 мм (рис. 6 а, в). По форме они овальные, пирамидальные,

бесформенные. Наиболее типичными минеральными микровключениями в кварце (рис. 6 б) являются разноориентированные выделения му-

сковита на границах зерен кварца (размер 0,05–0,2 мм). Внутри зерен кварца наблюдаются единичные призматические включения полевого

шпата (?) размером 0,02–0,03 мм. Единичные мелкие включения кальцита внутри зерен кварца (до 0,02 мм).

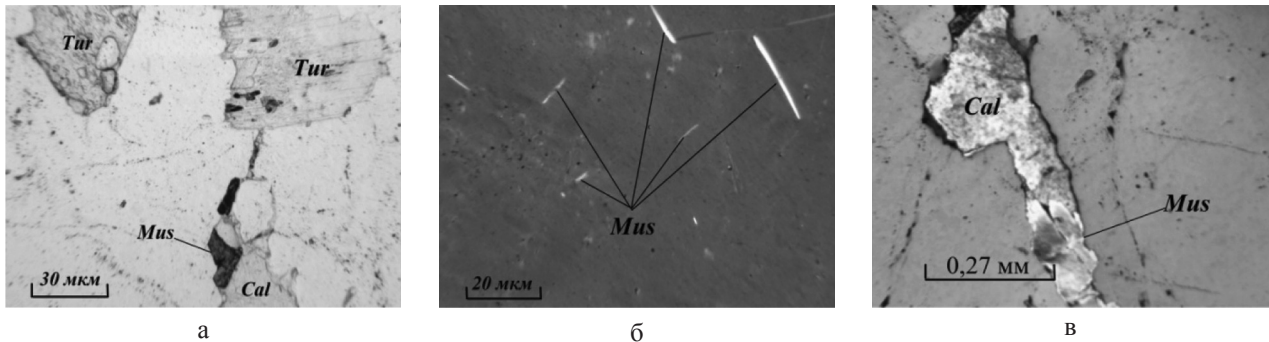


Рис. 6. Минеральные включения в кварце из отвалов рудника Малиновая Варакка: Tur – турмалин, Cal – кальцит, Mus – мусковит (фото шлифов)

Газово-жидких включений в кварце довольно много. Они развиты по трещинам залечивания, зонам дислокаций (рис. 7). Размеры включений от точечных до 0,45×0,22; 0,22×0,32 мм. По форме овальные, пирамидальные, бесформенные. Единичные включения часто с большим содержанием газовой фазы, а также цепочки газово-жидких включений, присутствуют и ограненные, частично ограненные ГЖВ.

Структура кварца из отвалов рудника Плотина гетеробластовая с участками мозаичной (рис. 8).

Текстура массивная. Проявляются структуры блочности, иногда четко различается линейная блочность и, в таком случае, наблюдается слабая ориентировка и вытянутость отдельных зерен кварца параллельно направлению этой блочности (рис. 8 в, г). Кварц двух генераций (рис. 8 д, е). Более крупный кварц первой генерации размером 5×2,5 мм, 1,0×0,5; 0,9×0,8; 1,4×1,0 мм. Зерна, в основном, всегда деформированы. Границы зерен как правило неровные, волнистые, зубчатые, ступенчатые.

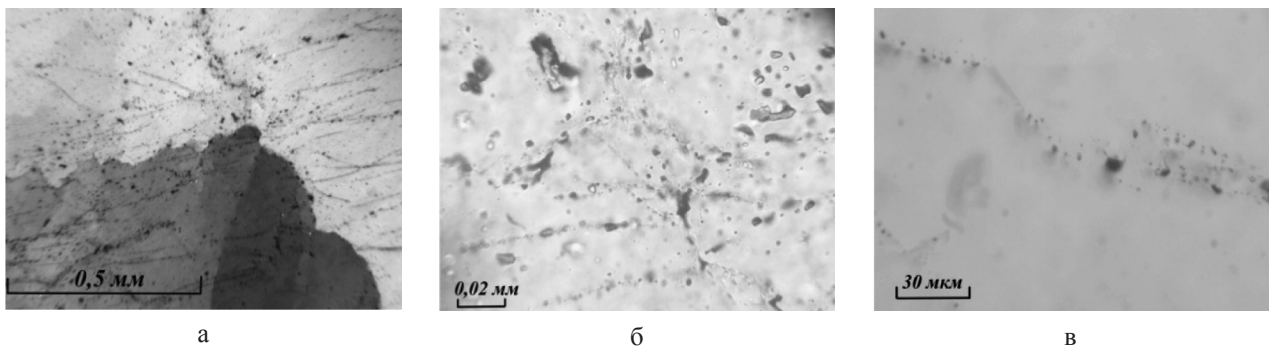


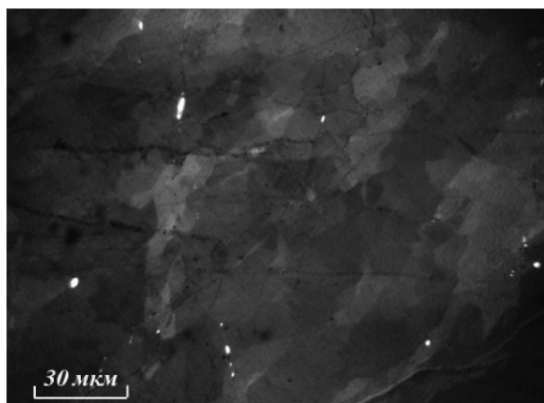
Рис. 7. ГЖВ в кварце из отвалов рудника Малиновая Варакка (фото шлифов)

В крупных зернах кварца наблюдаются каплевидные и пластинчатые включения полевых шпатов – альбита и микроклина (рис. 9 а). В мелком кварце в незначительных количествах наблюдается тонкоигольчатый или тонкопластинчатый мусковит, рутил. Содержание кальцита в некоторых образцах достигает 1 %. В кварце он образует поздние прожилки или гнездообразные скопления в которых развиты сульфиды (рис. 9 в). В образцах встречен турмалин (рис. 9 г).

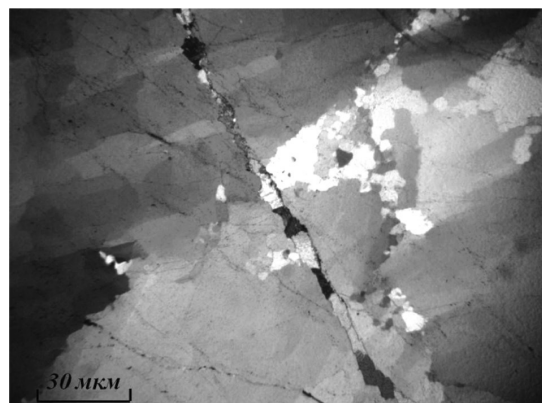
Включения микроклина и альбита (рис 10а) представлены мелкими пластинчатыми выделениями размером 0,06×0,05; 0,09×0,08 мм, му-

сковит в виде разно ориентированных тонких иголочек и пластинок размером 0,6×0,45; 0,15×0,1 мм. Тонкие иголки рутила встречены зонах мозаичного мелкого кварца и вдоль границ крупных зерен кварца, кальцит в виде тонких прожилков толщиной до 0,1–0,12 мм.

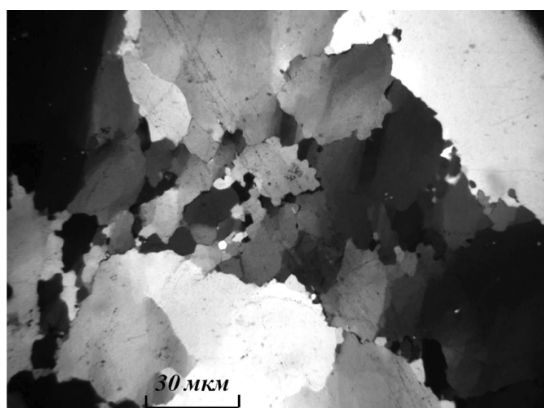
ГЖВ распределены крайне неравномерно (рис. 10). Основная часть сосредоточена в зонах перекристаллизации и вдоль трещинок блочности в крупных зернах первичного кварца (рис. 10 а, б). Форма включений разнообразна – округлая, веретенообразная, амёбовидная (рис. 10 в, г). Основным размер – менее 0,02 мм.



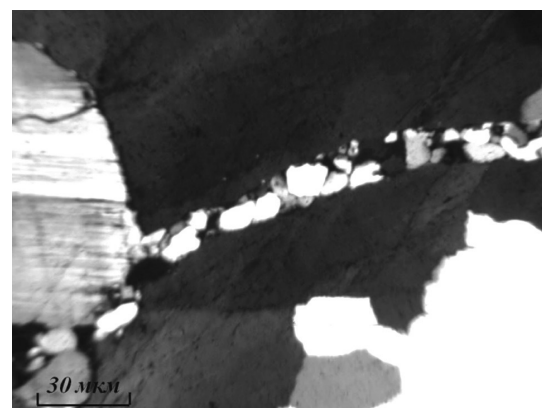
а



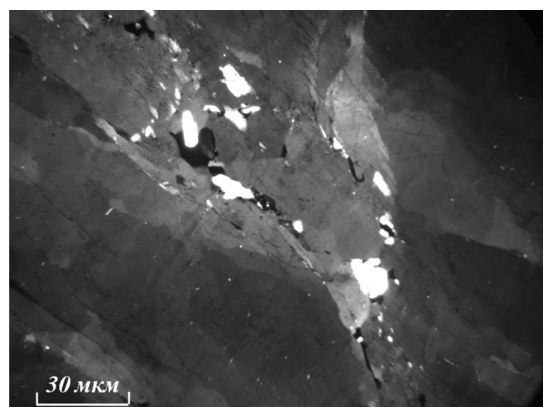
б



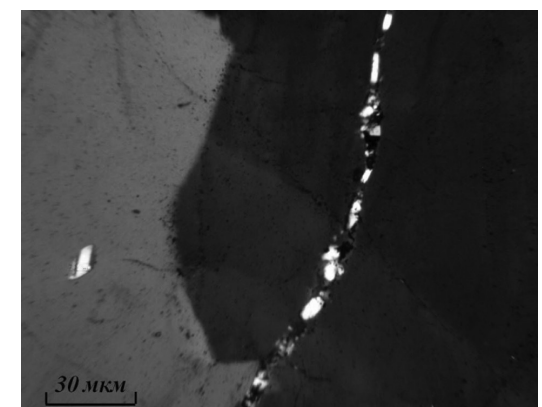
в



г

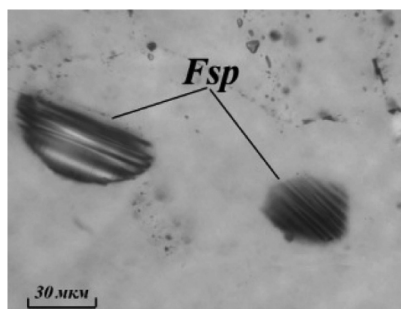


д

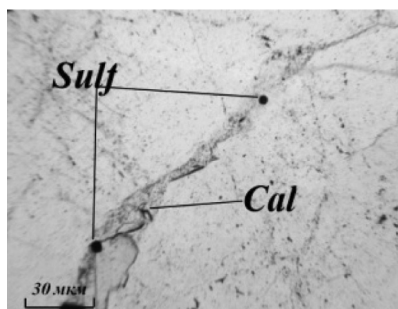


е

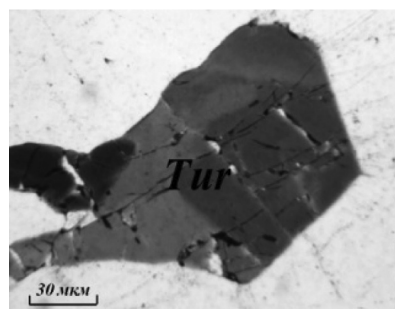
Рис. 8. Структурные особенности кварца из отвалов рудника Плотина: а, б – блочность кварца; в, г – мозаичный кварц; д, е – разномзернистый кварц двух генераций (фото шлифов)



а



б



в

Рис. 9. Минеральные включения в кварце из отвалов рудника Плотина: Fsp – полевошпат; Cal – кальцит; Sulf – сульфиды; Tur – турмалин (фото шлифов)



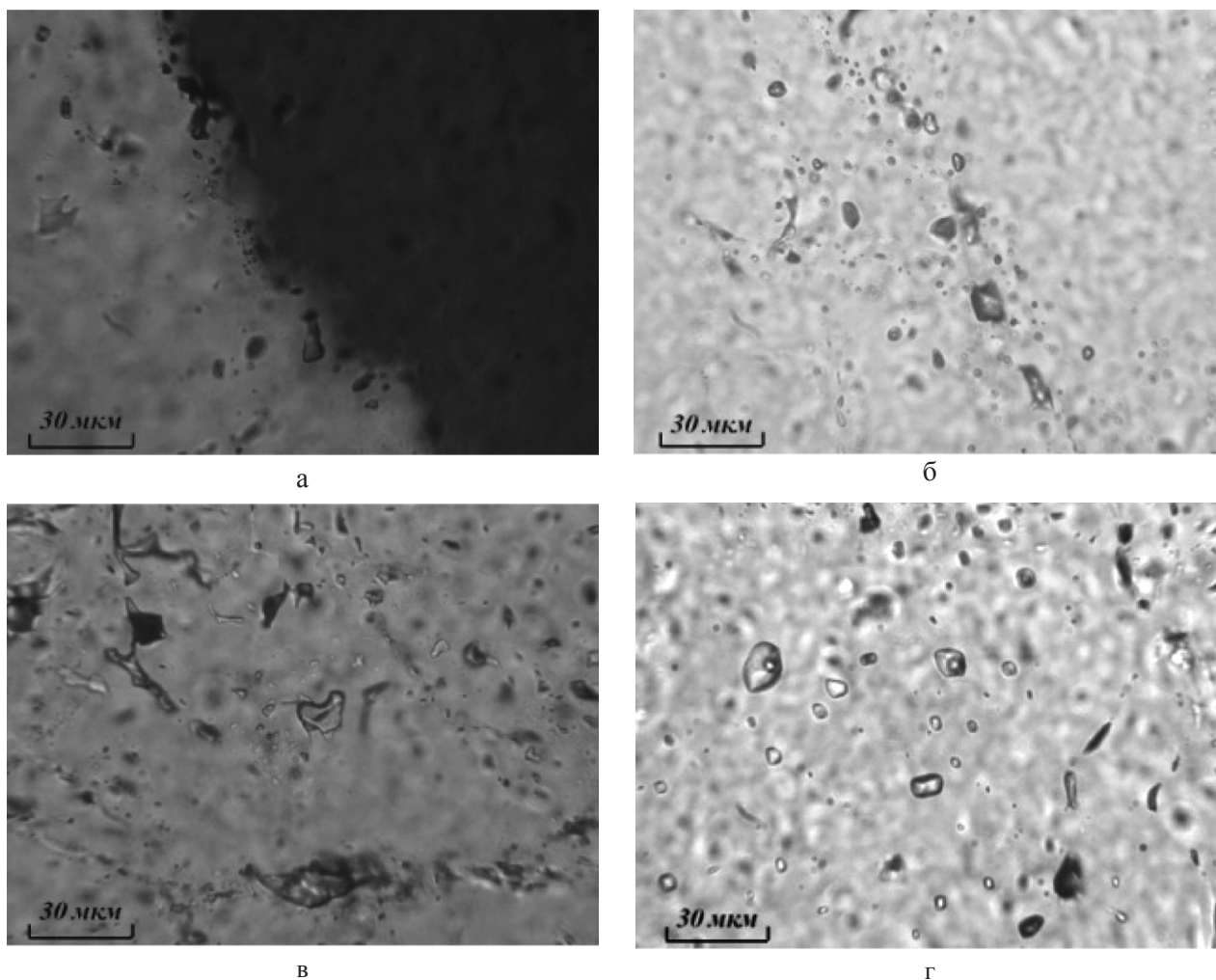


Рис. 10. ГЖВ в кварце из отвалов рудника Плотина (фото шлифов)

Газово-жидкие включения в кварцах рудников Малиновая Варакка и Плотина значительно варьируют не только по составу, но и по размеру включений и их количеству в кварцах. Наибольшая плотность ГЖВ у кварца рудника Плотина и колеблется от 291000 до

402000 в  $\text{см}^2$  при среднем (по 14 образцам) 330000 в  $\text{см}^2$

Основные минеральные примеси связаны с алюмосиликатами, слюдами, карбонатами, что подтверждает и элементный состав исходного кварца (табл. 2).

Таблица 2. Элементный состав кварца из отвалов слюдяных пегматитов

Рудник	Содержание элементов, ppm										
	Fe	Ti	Al	Mn	Mg	Ca	Ba	Cu	K	Li	Сумма
Малиновая Варакка	3,8	8,4	<b>120</b>	0,13	0,55	<b>11</b>	0,055	0,01	<b>18,5</b>	3,3	165,75
Плотина	750	7,9	<b>208</b>	4,5	50	<b>47</b>	0,54	0,7	<b>27</b>	0,29	1048,39
Тедино	3,2	6,7	<b>100</b>	0,1	2,8	<b>21</b>	1,3	0,05	<b>47</b>	0,77	182,92
Пиртима	1,9	6	<b>220</b>	0,11	0,65	<b>7,9</b>	0,46	0,08	<b>125</b>	1,7	363,8

*Примечание:* анализы выполнены в лаборатории Курчатовского института (Москва) методом ICP AES

Низкое качество кварца из отвалов рудника Плотина связано с развитием двух генераций кварца, при этом, вторая генерация более мелко-кварца содержит тонкоигольчатый или тонко-пластинчатый мусковит, рутил.

При изучении кварца на сканирующем электронном микроскопе установлены обособления

углеродного вещества (битумы?), развитые вдоль микротрещин и крупных ГЖВ (рис. 11).

Контроль фазовой чистоты кварцевого материала и структурная характеристика методом рентгеновской дифракции (дифрактометр Thermo Scientific ARL X'TRA) микровключений в кварце позволил установить присутствие ми-



кронных размеров слоистых алюмосиликатов с аморфными соединениями серы, гипса, не сфор-

мировавшимися обособлениями магнетита и пирита (рис. 12–14).

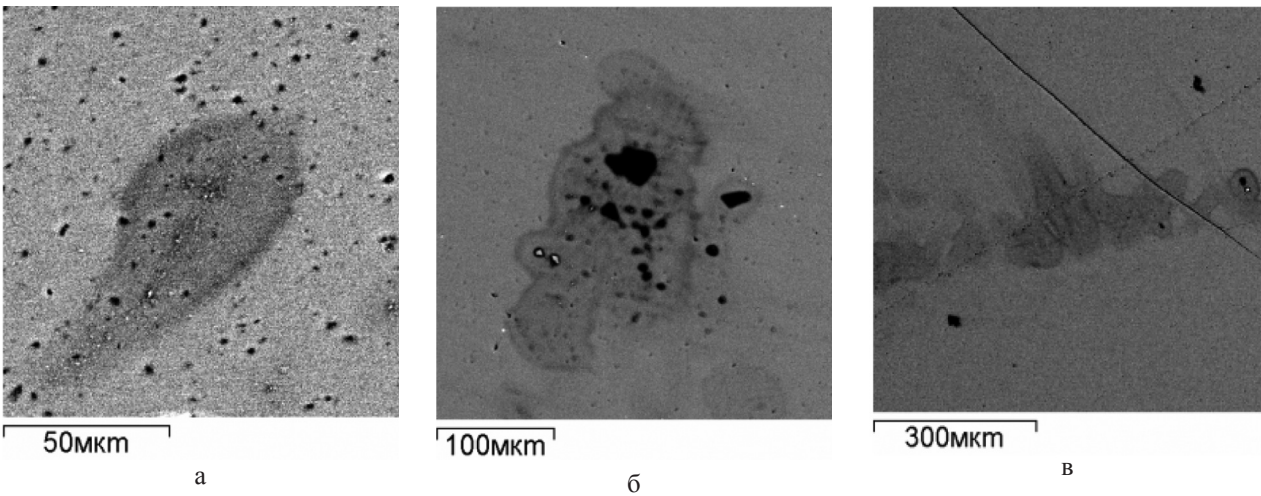


Рис. 11. Выделения углеродного вещества в кварце Плотина (фото СЭМ VEGA II LMU)

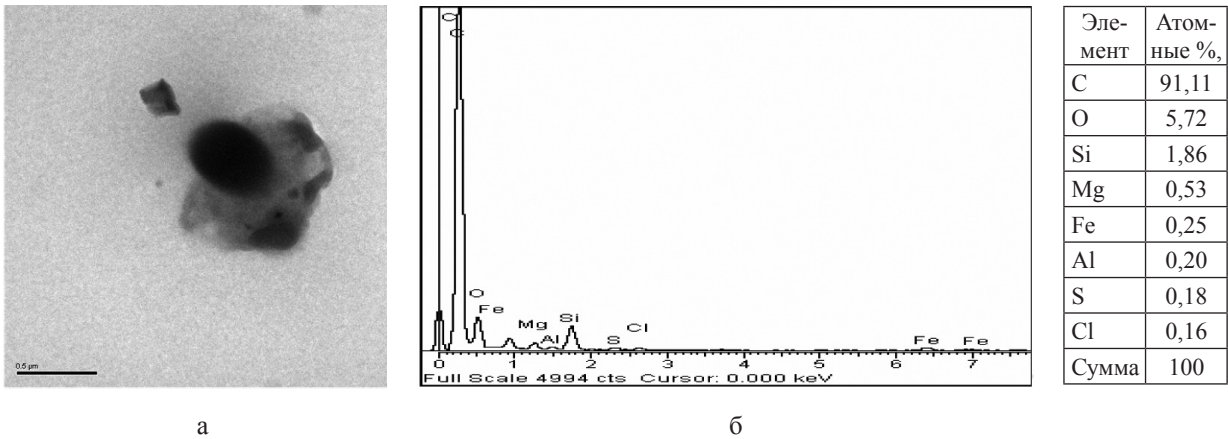


Рис. 12. Пластика кварца с включением слоистого алюмосиликата (серицит) и обособлением углеродного вещества. Рентгеновский характеристический спектр углеродного вещества и его состав

В составе углеродного вещества по данным рентгеновского характеристического спектра фиксируется сера, магний, железо, калий, каль-

ций и алюминий. В некоторых случаях содержание серы может быть достаточно значительным – до 29 ат %.

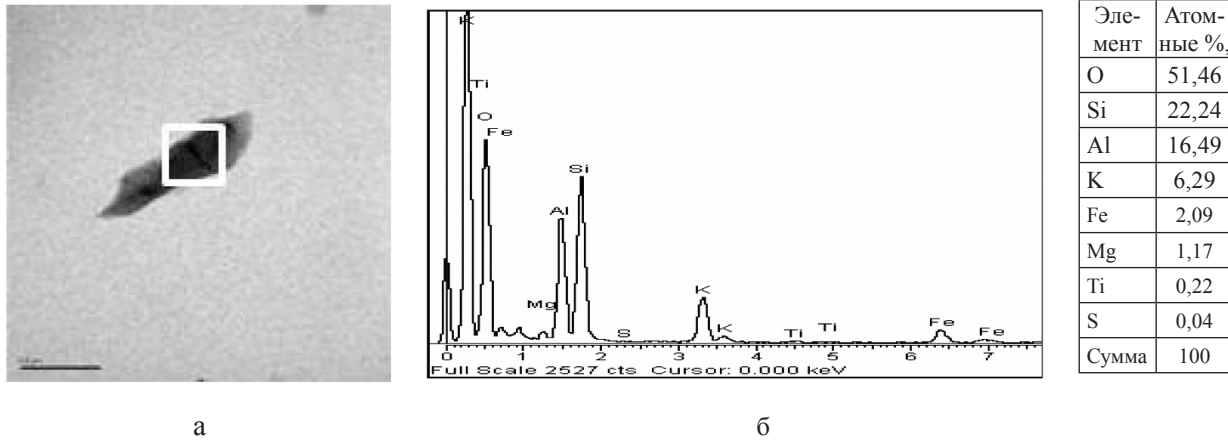
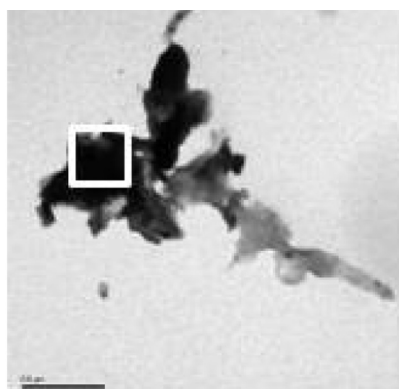
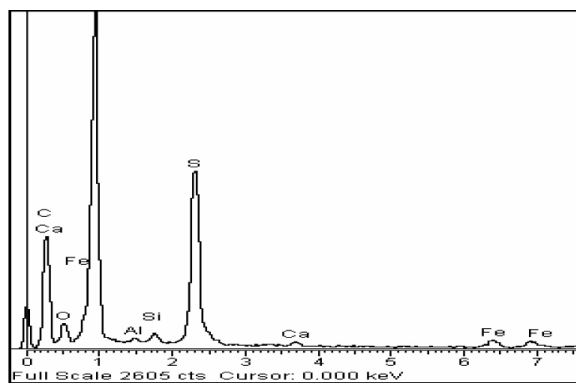


Рис. 13. Включение серицита с осевшим на него веществом. Рентгеновский характеристический спектр серицита с выбранного участка (квадрат) и соотношение элементов в нем



а



б

Элемент	Атомные %,
C	58,98
O	8,11
Si	1,42
Al	0,66
Ca	0,71
Fe	1,31
S	28,81
Сумма	100

Рис. 14. Обособление углеродного вещества с включенными в него частичками серицита и обособлением аморфной самородной серы – квадрат (а). Рентгеновский характеристический спектр с выбранного участка (квадрат) и соотношение элементов в нем

Данные по микроструктуре кварца рудника Плотина и примесям в нем, коррелируют с результатами анализа глубоко обогащенного квар-

ца, выполненного по стандартной схеме и с использованием нестандартных методов активации и экстракции битумов. (табл. 3).

Таблица 3. Содержание элементов в кварце разной степени очистки, ppm (мг/кг)

Элемент	Кварц предварительной стадии обогащения	Кварц глубокого обогащения по стандартной технологии	Кварц глубокого обогащения с исп. инновационных решений	Кварц глубокого обогащения с использованием экстракции битумов
<b>Fe</b>	<b>430; 270</b>	<b>66; 39</b>	<b>40; 51</b>	<b>0,63</b>
Ti	6; 14	7,6	5,8	4,8
Zr	0,29	0,1	0,13; 0,05	≤0,05
Mn	0,60	0,051	0,052; 0,029	0,02
<b>Al</b>	<b>170; 250</b>	<b>82</b>	<b>52</b>	<b>42</b>
Cu	1,1; 0,61	0,07	0,04	0,012
Zn	0,72	0,14	~0,08	-
B	0,2; 0,44	0,37	0,4	0,9
Ni	0,36	0,095	0,071	≤0,01
Cr	0,36; 0,22	0,09; 0,016	0,022	≤0,01
Co	0,07	0,019	0,018	≤0,01
<b>Ca</b>	<b>26; 38</b>	<b>10</b>	<b>1,1</b>	<b>1,1</b>
Sr	0,6; 0,94	0,27	0,032	≤0,01
Ba	0,49	0,27; 0,1	0,024; 0,053	-
Mg	4,7	3,9; 0,8	0,18	0,22
<b>Na</b>	<b>50</b>	<b>22</b>	<b>5,6</b>	<b>6,8</b>
<b>K</b>	<b>23</b>	<b>12</b>	<b>3,9</b>	<b>1,6</b>
Li	0,29	0,22	0,27	0,9
Ge	1,8	1,4	1,4	-
P	1,2; 2,5	<0,1	<0,1	≤0,2
<b>S</b>	<b>370</b>	<b>73; 43</b>	<b>49</b>	<b>-</b>
сумма				<b>42,25</b>

Анализ выполнен в лаборатории Курчатовского института методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-AES); Через знак “;” приведены значения параллельных определений

Кварц опробованных отвалов рудников Малиновая Варажка и Плотина в естественном виде пригоден для:

- производства карбида кремния ( $\text{SiO}_2$  98,5;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 0,5;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – 0,3;  $\text{CaO}$  – 0,3;  $\text{Na}_2\text{O}$  – 0,3); -в стекольной промышленности ( $\text{SiO}_2$  95–99,8;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  0,01–0,25;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  0,1– 4,0);
- производства кварцевой керамики ( $\text{SiO}_2$  не менее 99,2 %,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – 0,02;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 0,2);
- производства изделий из тонкой керамики ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 \leq 0,3$ ;  $\text{CaO} \leq 2$ ;  $\text{SiO}_2$  93–95);

- для сварочных материалов ( $\text{SiO}_2 \leq 97$ );
- для литья по выплавляемым моделям ( $\text{SiO}_2 \leq 98$ ).

Для плавочных сортов кварца («ОЧК») предъявляются наиболее жесткие требования к качеству концентратов. В России требования к данным сортам регламентируются ТУ 5726–002–11496665–97, где сорта КПО 1–5 (кварцевые концентраты промежуточной чистоты с суммой элементов-примесей от 116 до 294 ppm и суммой минеральных примесей от 100 до 200 ppm) представляются вполне применимыми для таких, по сути, нетрадиционных плавочных материалов как кварц из техногенных отвалов слюдяных пегматитов.

После глубокого обогащения кварц из отвалов рудника Плотина имеет содержание примесей на уровне 42,25 ppm и может быть использован в качестве сырья многоцелевого назначения – для варки оптических и увиолевых стекол (ОСТ 41–01–159–80 и ОСТ 41–27–72).

Цены на высокочистый природный кварц для плавки в среднем по миру составляют 2000 \$/тонну, по сравнению с ценой на рядовой кварц низкого качества – 15–20 \$/тонну [40]. По данным Бюро Статистики Американской Геологической службы [23] в 2013 г. цены на кварцевые концентраты варьировали от 20 до 900 \$/кг, в зависимости от области использования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Государственный баланс запасов полезных ископаемых Российской Федерации Кварц. М. 2014 г.
2. Минерально-сырьевая база Республики Карелия / Книга 2. Неметаллические полезные ископаемые. Петрозаводск. Карелия. 2006. 355 с.
3. Кварцевое сырье Карелии. Данилевская Л. А., Скамницкая Л. С., Щипцов В. В. Петрозаводск. КарНЦ РАН. 2004. 226 с.

## ТИПОМОРФНЫЕ ОСОБЕННОСТИ И ПРОГНОЗ ОБОГАТИМОСТИ КВАРЦИТО-ПЕСЧАНИКОВ ГИРВАССКОЙ ПЛОЩАДИ (ЦЕНТРАЛЬНАЯ КАРЕЛИЯ)

*Светова Е. Н., Скамницкая Л. С.*

*ИГ КарНЦ РАН, г. Петрозаводск*

Настоящая работа является результатом продолжающихся исследований нетрадиционного кварцевого сырья на территории Гирвасской площади в Центральной Карелии. Ранее нами было показано, что одним из перспективных природных материалов для получения высококачественных кварцевых концентратов может служить галечный кварц палеопротерозойских кварцевых конгломератов, широко распространенных в пределах изучаемого района [1]. Однако извлечение гальки из цемента конгломератов оказалось технически сложной задачей, вследствие чего возник интерес оценить возможность комплексного использования кварцевой гальки и вмещающего ее кварцито-песчанистого цемента. Для решения этой задачи изучен минеральный и химический состав кварцито-песчаников, выявлены основные типоморфные особенности, выполнены технологические эксперименты по очистке кварца и получению кварцевых концентратов.

В пределах Гирвасской площади кварцито-песчаники формируют значительную часть палеопротерозойской осадочной толщи, они выполняют роль цемента в кварцевых конгломератах, а также залегают в виде мощных пластов, переслаивающихся с конгломератами и гравелитами. Макроскопически кварцито-песчаники представляют собой плотные светлые серо-зеленые породы с крупно- и среднезернистой структурой кварцево-серицитового состава. Очень часто они несут признаки расщепления, отмечается разная степень ожелезнения. Технологические пробы кварцито-песчаников, внешне различающиеся по структуре, окраске, степени ожелезнения были отобраны с разных участков Гирвасской площади как из цемента конгломератов, так и из отдельных прослоев.

Образцы песчаников из пяти технологических проб проанализированы методами рентгенофлуоресцентной спектроскопии, оптической и электронной микроскопии, рентгеноструктурного и

микронзондового анализа. Петрографическое изучение кварцито-песчаников в шлифах проведено с использованием оптического микроскопа ПОЛАМ Р-211 минералогом О. В. Букчиной. Силикатный анализ и полуколичественное определение микропримесей выполнены на рентгенофлуоресцентном спектрометре Thermo Scientific ARL Advant'X (аналитик С. В. Бурдюх). Рентгенографическое исследование проведено на автоматическом дифрактометре Thermo Scientific ARL X'TRA с медным излучением при температуре 25 °С (аналитик И. С. Инина). Электронно-микроскопическое и микронзондовое изучение кварцевых песчаников проведено на сканирующем электронном микроскопе VEGA II LSH (Tescan) с энергодисперсионным анализатором INCA Energy 350. Анализировались шлифы кварцевых песчаников, а также кварцевая крупка различных фракций и обогащенный концентрат. Все исследования выполнены на базе комплекса аналитического оборудования Института геологии КарНЦ РАН.

Петрографическое изучение шлифов кварцито-песчаников из технологических проб показало, что все они, за исключением образца Г-8, имеют приблизительно однотипную структуру и состав. Объем обломочной части породы в разных пробах варьирует от 60 до 80 %. Обломки представлены угловатыми, слабоокатанными зернами размером от 0,1 до 1,5 мм, встречаются зерна гравийной размерности. Преобладающая часть обломков имеет размер около 1 мм. Состав обломков – кварцевый. Это либо отдельные слабдеформированные зерна с волнистым угасанием или агрегаты, состоящие из среднезернистых слабдеформированных зерен кварца в ассоциации с мелкозернистым мозаичным кварцем (рис. 1, а). Наиболее крупные зерна иногда имеют трещиноватость, по которой развиваются перекристаллизованный кварц, тонкочешуйчатый мусковит, отмечаются цепочки газовой-жидких включений (рис. 1, б, в). Цемент породы тонкозернистый, состоит в основном из тонкопластинчатого кварца и мусковита. Рудные минералы представлены гнездообразными скоплениями натечных по форме зерен гематита. Акцессорные минералы – единичные зерна циркона и апатита, встречаются в крупных зернах кварца и приурочены к зонам трещиноватости. Образец кварцито-песчаника (Г-8) характеризуется меньшим, по сравнению с остальными образцами, объемом обломочной

части породы (около 40 %), состоящей из угловатых и слабоокатанных отдельных зерен кварца размером от 0,1 до 1 мм и обломков, состоящих из нескольких зерен размером до 8 мм. В отдельных зернах встречаются тонкие чешуйки мусковита, апатит, турмалин зеленый, включения гидроксидов железа, размеры микровключений – сотые доли мм. Крупные обломки слабо трещиноваты, по трещинам развиты тонкие цепочки газовой-жидких включений, тонкочешуйчатый мусковит. Цемент породы кварцполевошпатовый с мусковитом и биотитом. Зерна кварца в цементе имеют размер от тысячных долей до 0,15×0,15 мм с ровными, слабоизвилистыми краями с ровным угасанием. Четко различаются пластинчатые зерна плагиоклаза с полисинтетическим двойникованием размером от 0,08×0,08 мм до 0,26×0,2 мм (рис. 1, г). Зерна плагиоклаза пелитизированы в различной степени, часто к ним приурочена тонкая сыпь серно-красных гидроксидов железа. Единичные пластинки биотита ярко-бурого и зеленовато-бурого цвета имеют размер от тысячных долей до 0,2×0,56 мм, образуют скопления разноориентированных агрегатов среди мелкозернистого кварца (рис. 1, д). Слюдистые минералы распределены неравномерно. Мусковит образует оторочки вокруг обломков кварца и присутствует в цементе, образуя обогащенные слюдой прослойки. В массе цемента наблюдаются выделения гидроксидов железа, среди которых преобладает хлопьевидный гётит (рис. 1, е), различаются единичные зерна циркона и турмалина размером сотые и тысячные доли мм.

По данным рентгенофлуоресцентного спектрального анализа кварцито-песчаники характеризуются стабильностью химического и микроэлементного состава. Среднее содержание основных петрогенных оксидов составляет (мас. %): кремния – 86 %, алюминия – 8 %, калия – 2 %, железа – 0,8 %, кальция – 0,3 %, титана – 0,1 %. Среди микропримесей установлены S, Ba, Zr, Rb, Th, Mn, V, Cr, Cs, Zn, Sr, Ni. Химические составы кварцито-песчаников Гирвасской площади приведены в табл. 1.

Для структурной характеристики кварцевого субстрата выполнено рентгенографическое исследование кварцито-песчаников. На дифрактограммах порошковых препаратов фиксировались отражения  $\alpha$ -кварца, других форм кремнезема обнаружено не было. Значения параметров элементарной ячейки кварца из песчаников со-



ставили:  $a=4,9138\pm0,0001 \text{ \AA}$ ,  $c=5,4051\pm0,0001 \text{ \AA}$ ,  $V=113,02 \text{ \AA}^3$ . Величина «индекса кристалличности», рассчитанная в соответствии с методикой, предложенной К. Дж. Мурата и М. Б. Норманом [4] по порошковым дифрактограммам кварца в интервале углов отражения  $2\theta = 66\text{--}69^\circ$ , со-

ставляет 7,41. Рентгеноструктурные характеристики кварца указывают на достаточно хорошую упорядоченность его кристаллической решетки и позволяют рассматривать кварц песчаников в качестве сырья для получения высококачественного кварцевого концентрата.

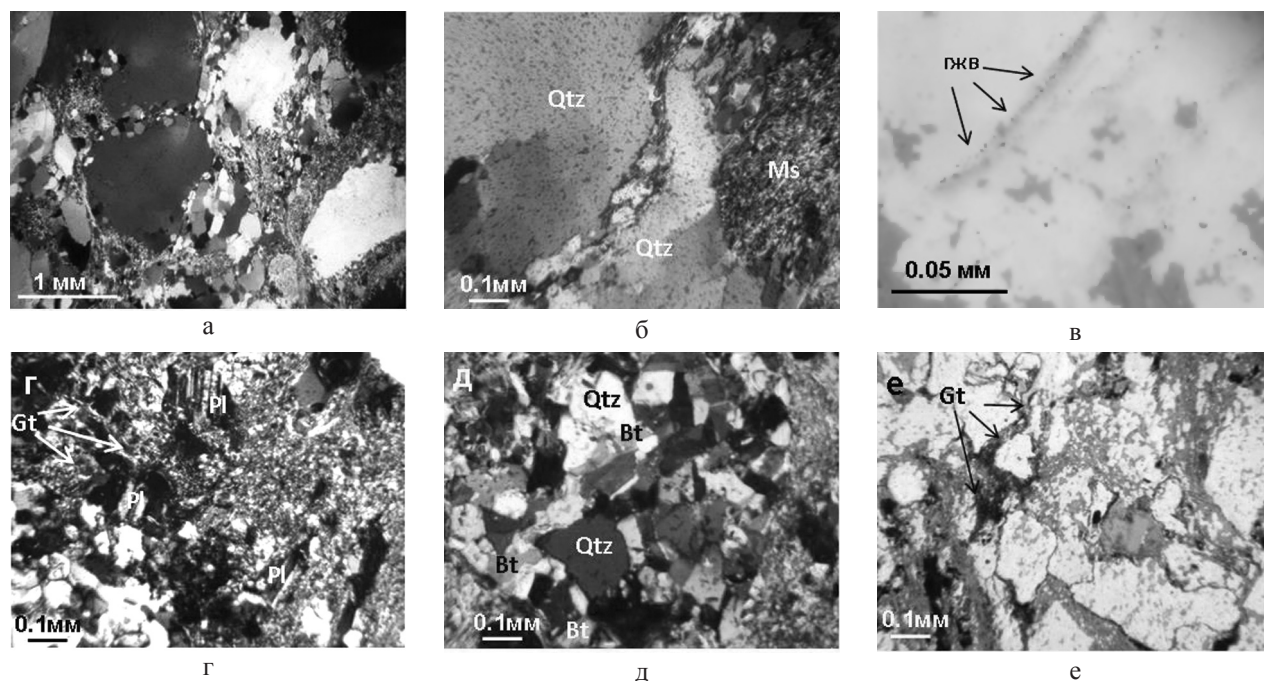


Рис. 1. Фото шлифов кварцито-песчаников Гирвасской площади: а – слабдеформированные зерна кварца в ассоциации с мозаичным кварцем в слюдином цементе; б – зона перекристаллизации кварца; в – цепочки ГЖВ в обломке кварца; кварц-полевошпат-серицитовый цемент г – пластинчатые зерна плагиоклаза; д – мелкие зерна кварца и пластинки биотита; е – выделения гидроксидов железа. а, б, г, д – николи скрещены; в, е – свет проходящий

Таблица 1. Химический состав кварцито-песчаников Гирвасской площади по технологическим пробам, мас. %

№ пробы	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> общ.	Na <sub>2</sub> O	CaO	K <sub>2</sub> O	MgO	MnO	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	S	п. п. п.	сумма
Г-3/1	87,66	6,46	0,61	0,00	0,29	1,85	0,10	0,01	0,06	0,00	0,02	0,94	98,00
Г-4	87,02	9,08	0,73	0,00	0,27	1,93	0,12	0,01	0,06	0,00	0,02	0,87	100,11
Г-5/1	88,66	7,37	0,54	0,00	0,28	2,11	0,10	0,01	0,07	0,00	0,02	0,89	100,05
Г-5/2	83,73	9,97	0,75	0,00	0,45	1,83	0,25	0,02	0,14	0,11	0,03	0,95	98,22
Г-8	87,60	4,95	1,43	0,60	0,42	0,87	0,64	0,02	0,25	0,10	0,03	1,19	98,09

Для установления морфологических особенностей зерен и определения вариации химического состава породообразующих минералов, слагающих кварцевые песчаники, выполнено сравнительное электронно-микроскопическое и микрозондовое изучение четырех типовых проб (Г-3/1, Г-4, Г-5/2, Г-8) кварцито-песчаников в аншлифах. По данным электронно-микроскопического сканирования образцы Г-3/1, Г-4 и Г-5/2 содержат однотипный слюдистый цемент, представленный мусковитом, развитый в основном в виде

гнездовидных выделений (до 1 мм) и крупных лейст, локализованных вдоль границ кварцевых зерен (рис. 2). Иногда в мусковитовом цементе присутствуют мельчайшие кварцевые обломки (рис. 2, б). По химическому составу мусковит достаточно однороден, отмечены незначительные вариации в содержании железа (0–3 %) и магния (0–1,4 %). Образец Г-8 в качестве слюдистого цемента наряду с мусковитом содержит биотит, что отмечено ранее при изучении шлифов в проходящем свете. Для всех разновидностей песчаников

характерно наличие акцессорных зерен циркона разной степени сохранности, локализованных

главным образом в цементе, но встречающихся иногда и внутри гранул кварца (рис. 2, в, г).

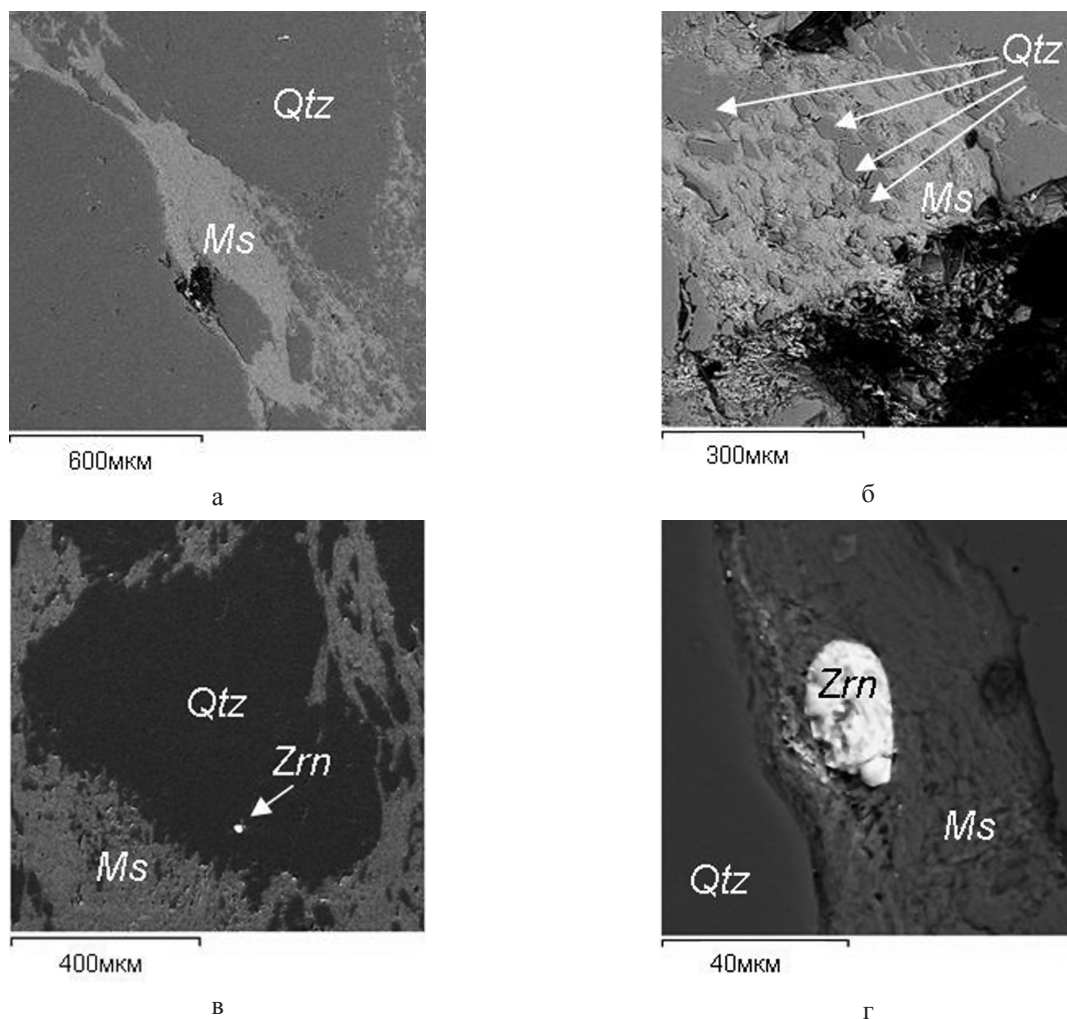


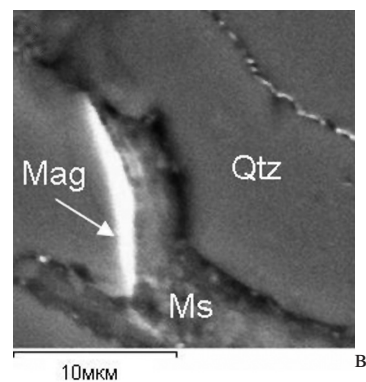
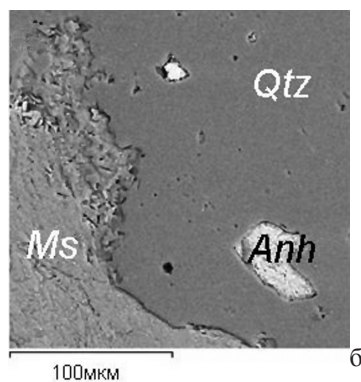
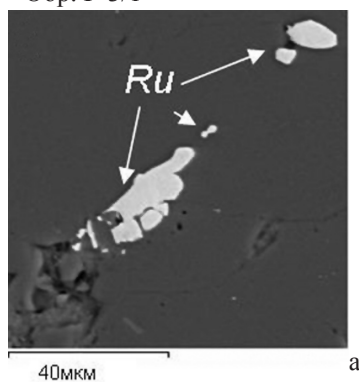
Рис. 2. Растровые изображения обломков кварца и выделений мусковита в кварцито-песчаниках Гирвасской площади

Принципиальное отличие кварцито-песчаников заключается в видовом составе акцессорных минералов. Так, для одной из наименее загрязненной визуальнo проб (Г-3/1) наряду с цирконом характерны лишь включения изометричных зерен рутила, ангидрита, магнетита (рис. 3, а–в). Для пробы Г-4 характерны натечные образования гематита, в виде срастаний и других достаточно крупных выделений и редкие включения пирита в кварце (рис. 3, г–е). Для этой пробы характерна плохая степень сохранности первичных контуров гранул кварца (рис. 2, в). Для пробы Г-5/2 характерно присутствие большого количества скоплений зерен фторапатита (по 20–50 шт), плотно сцементированных мусковитом, что, вероятно, обуславливает зеленоватый оттенок породы (рис. 3, ж). Фторапатит представлен удлинёнными призматическими, иногда сла-

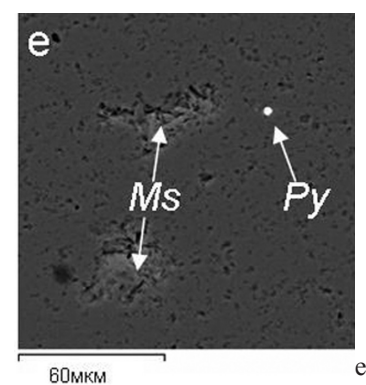
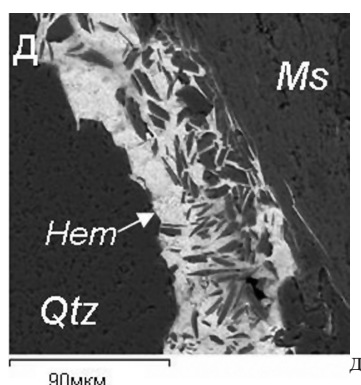
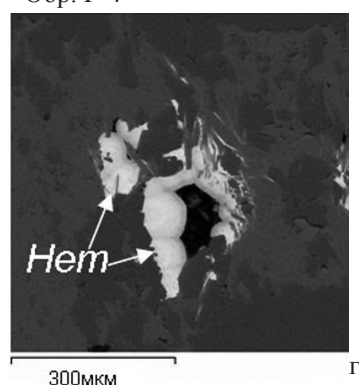
боокатанными с пористой структурой зёрнами, ориентированными согласно сланцеватости мусковита. Размер зёрен варьирует от 10 до 100 мкм по длинной оси. Химический состав, по микрозондовым данным, выдержанный (мас. %): СаО 39,9–42,7, Р<sub>2</sub>О<sub>5</sub> 55,1–56,4, F 3,5–3,7. Рутил обнаружен в виде редких крупных (>100 мкм) сильно раздробленных выделений, развитых вдоль границ кварцевых зёрен, а также в форме единичных микровключений внутри кварцевых зёрен (рис. 3, з, и). Наиболее загрязнённая проба кварцито-песчаника Г-8 со следами ожелезнения содержит в слюдистом цементе прожилки хлорита, крупные зёрна альбита, турмалина (по химическому составу отвечающие драгиту) и гидроксилapatита (рис. 3, к–м). Сводная характеристика технологических проб кварцито-песчаников и видовой состав акцессорных минералов приведены в табл. 2.



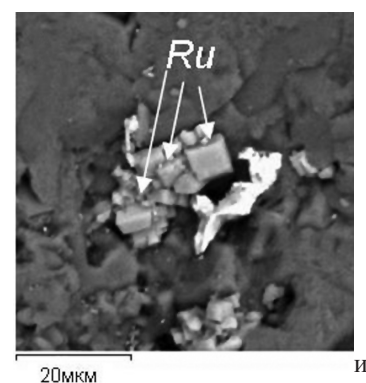
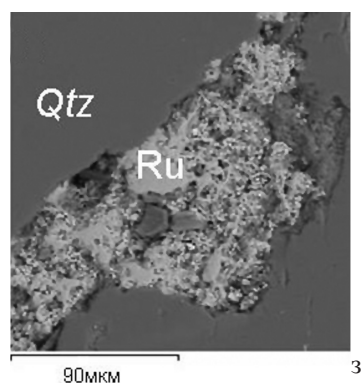
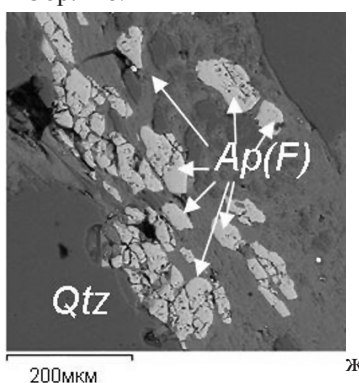
Обр. Г-3/1



Обр. Г-4



Обр. Г-5/2



Обр. Г-8

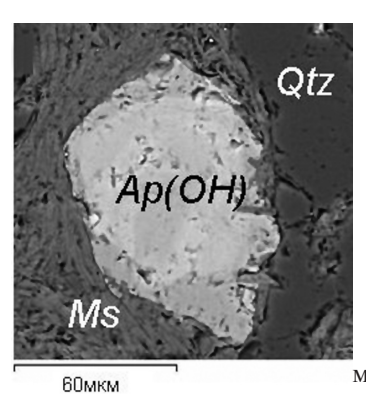
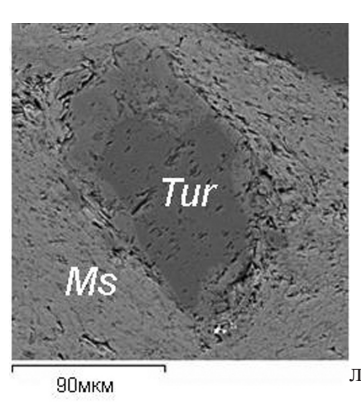
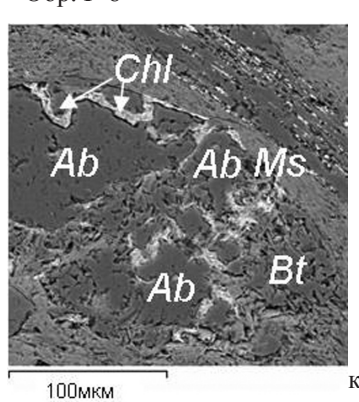


Рис. 3. Растровые изображения акцессорных минералов в аншлифах технологических проб кварцито-песчаников Гирвасской площади: Ru – рутил, Ms – мусковит, Qtz – кварц, Anh – ангидрит, Zrn – циркон, Hem – гематит, Py – пирит, Ap – апатит, Ab – альбит, Chl – хлорит, Bt – биотит, Tur – турмалин

Таблица 2. Характеристика проб кварцито-песчаников Гирвасской площади

№ пробы, место отбора	Характеристика	Цемент	Аксессуары
Г-3/1 <i>из отдельного прослоя</i>	Крупнозернистый (с примесью гравийных зерен), слабобассланцованный, серицитизированный, светло-серый	Мусковитовый	циркон биотит рутил ангидрит магнетит
Г-4 <i>из цемента конгломератов</i>	Крупнозернистый (с примесью гравийных зерен), слабобассланцованный, серицитизированный, светло-серый	Мусковитовый	циркон гематит пирит
Г-5/2 <i>из цемента конгломератов</i>	Крупнозернистый (с примесью гравийных зерен), слабобассланцованный, серицитизированный, темно серо-зеленый	Мусковитовый	фторапатит рутил циркон монацит торит
Г-8 <i>из цемента конгломератов</i>	Крупнозернистый (с примесью гравийных зерен), серицитизированный, ожелезненный, грязно коричнево-серый	Кварц-полевошпатовый с биотитом и мусковитом	циркон гидроксилапатит альбит хлорит гематит турмалин (дравит)

В процессе электронно-микроскопических исследований в кварцито-песчаниках установлена редкоземельная минерализация, возможно, имеющая практическое значение в случае комплексного использования данных пород. Редкоземельные минеральные фазы размером от 5 до 200 мкм представлены, главным образом, монацитом, ксенотимом и минералами тория (рис. 4). Они приурочены в основном к выде-

лениям мусковита, цементирующим кварцевые зерна, но в редких случаях отмечаются и внутри этих зерен. Монацит по данным микрозондовых анализов содержит варьирующие концентрации:  $\text{La}_2\text{O}_3$  7–45 мас. %,  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  2–36 мас. %,  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  2–12 мас. %. Ксенотим содержит 51–55 %  $\text{Y}_2\text{O}_3$ , отмечена примесь  $\text{Dy}_2\text{O}_3$  – 4,5 %. Среди ториевых минералов установлены фосфоторит и кальцитоторит ( $\text{ThO}_2$  до 60 %).

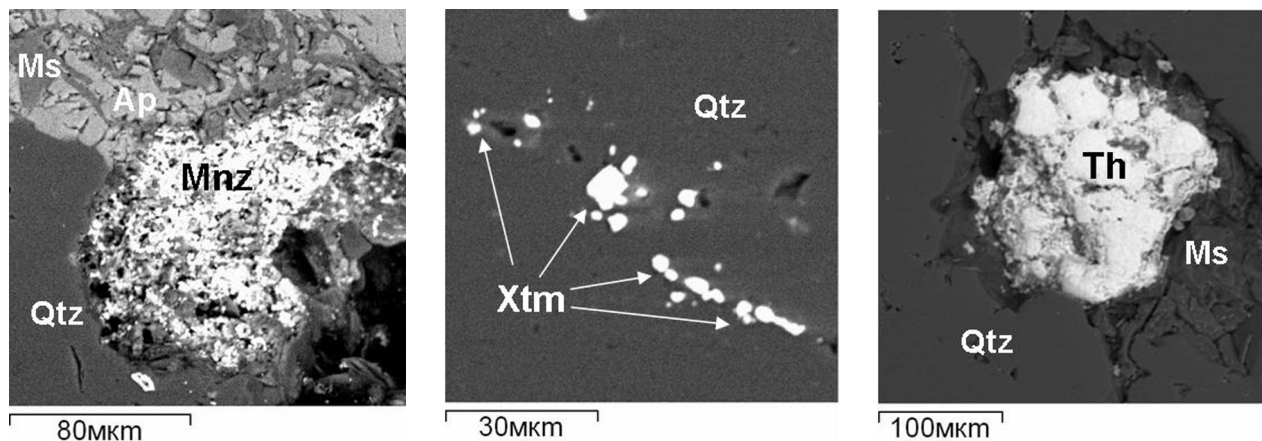


Рис. 4. Растровые изображения редкометалльных фаз (Zrn – циркон, Mnz – монацит, Xtm – ксенотим, Th – торит) в кварцито-песчаниках Гирвасской площади

Выбор наиболее рациональных методов обогащения кварцевого сырья в каждом конкретном случае зависит от микроструктуры самого кварца, размеров и формы вхождения примесей в кварце [3, 4]. Для определения необходимой крупности измельчения кварца, для вскрытия от цемента предварительные минералого-технологические исследования были проведены на одной технологической пробе Г-3/1. Подготовка пробы, учи-

тывая преобладающую крупность зерен кварца в песчанике, включала щадящее дробление и измельчение в замкнутом цикле с классификацией по крупности на сите 1 мм (рис. 5). Готовую фракцию размером 1–0 мм фракционировали на узкие классы крупности: 1–0,63 мм, 0,63–0,5 мм, 0,5–0,4 мм, 0,4–0,1 мм и <0,1 мм, которые отдельно анализировали под электронным микроскопом с целью визуализации не раскрывшихся по-



сле измельчения микроминеральных включений, выявления особенностей поверхности зерен.

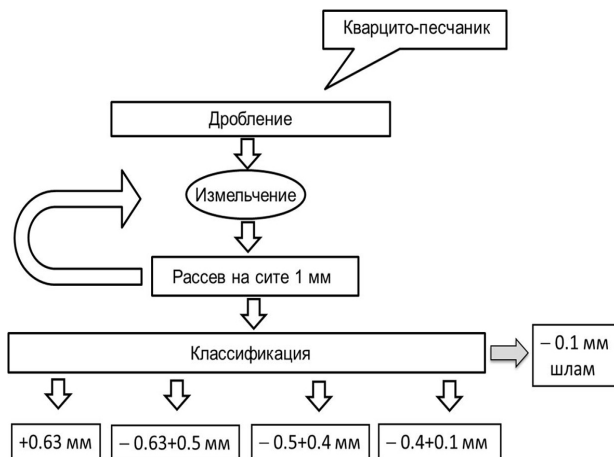


Рис. 5. Схема измельчения и классификации технологических проб кварцито-песчаников

Крупка кварца фракции  $+0,63$  мм представлена в основном изометричными, хорошо окатанными зернами. Примерно половина из них сохраняет на себе фрагменты мусковитового цемента в виде чешуек, образующих корочки толщиной около 20–30 мкм (рис. 6, а). Отмечены ха-

рактерные следы от вскрывшихся газовой-жидких включений (рис. 6, б). В ряде случаев, на поверхности зерен были обнаружены железосодержащие фазы, представленные самородными хлопьевидными выделениями железа (5–50 мкм) и его оксидными формами (рис. 6, в), а также микровключения рутила и циркона. К сожалению, несмотря на визуальную чистоту крупки фракции  $(+0,63)$ , она содержит значительное количество зерен с остатками цемента, не высвободившегося в процессе дробления и измельчения.

В крупке фракции  $-0,63+0,5$  мм преобладают чистые, с гладкими поверхностями зерна кварца без посторонних налетов и примазок (рис. 6, г). Однако часть зерен сохраняет на себе мусковитовые корочки (рис. 6, д), плотно сросшиеся с кварцем, а также упомянутые ранее налеты самородного железа, иногда почти сплошь покрывающие кварцевые обломки. К выделениям тонкочешуйчатого мусковита могут быть приурочены хлопьевидные агрегаты магнетита (рис. 6, е), а в самом кварце установлены лишь единичные зерна циркона разной степени сохранности.

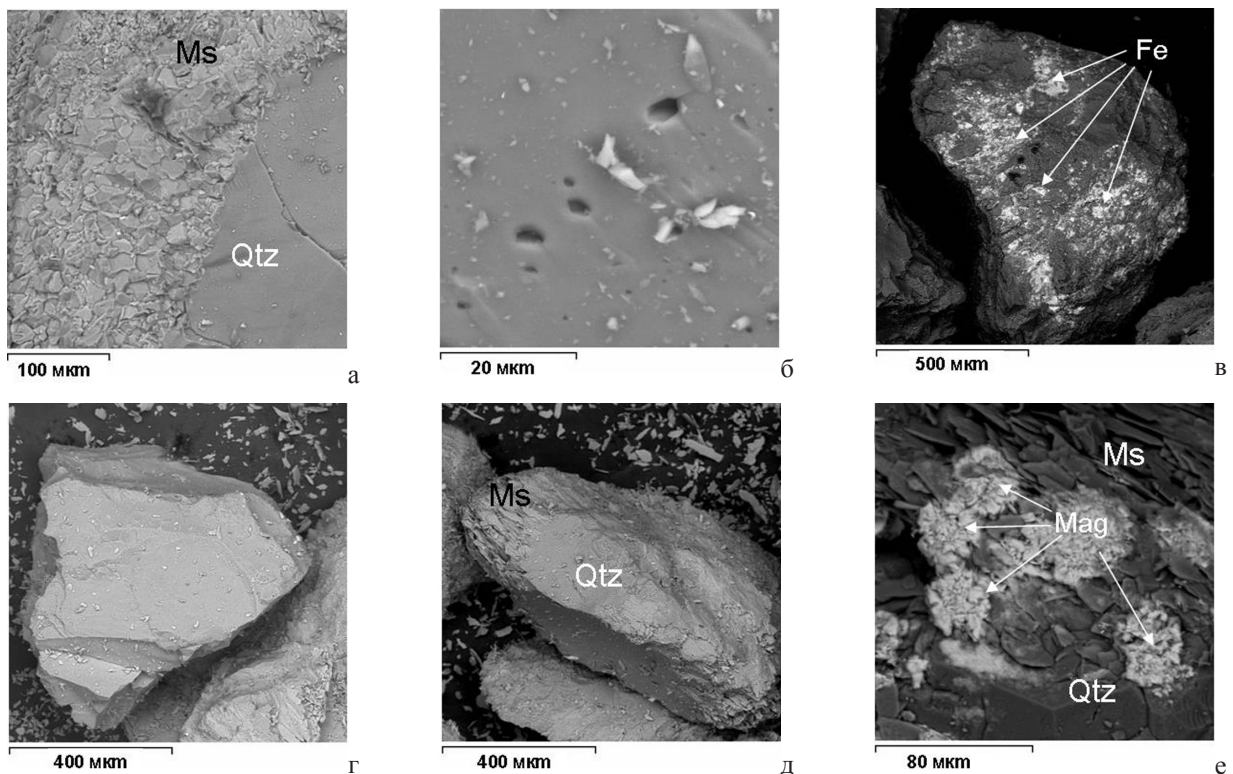


Рис. 6. Растровые изображения зерен (и фрагментов поверхности) кварцевой крупки  
Верхний ряд – фракция  $+0,63$  мм, нижний ряд – фракция  $-0,63+0,5$  мм:

а – рассеянные выделения самородного железа на поверхности кварца, б – поверхность зерна кварца частично покрытая чешуйками мусковита, в – следы от вскрывшихся газовой-жидких включений, г – чистое кварцевое зерно, д – зерно частично покрытое чешуйками мусковита, е – хлопьевидные выделения магнетита в мусковите на поверхности кварцевого зерна

В более тонкой фракции кварцевой крупки  $-0,5+0,4$  мм количество чистых зерен, лишенных серицитового налета, значительно больше, чем в предыдущем случае. Около 5–10 % зерен содержат на поверхности прочно удерживающиеся мусковитовые чешуйки, к которым нередко приурочены выделения магнетита, самородного железа, микровключения монацита (рис. 7, а, б). Среди микроминеральных включений в кварце отмечены зерна циркона размером до 50 мкм (рис. 7, в).

Кварцевая крупка самой тонкой фракции  $-0,4+0,1$  мм содержит максимальное количество чистых зерен, лишенных мусковитового цемента, но зерна с налетом серицита присутствуют.

Очевидно, что для получения чистого кварца из кварцито-песчаников необходим подбор способов подготовки и обогащения, учитывающих особенности загрязнения мусковитом поверхности кварцевых зерен. Крупка фракции  $-0,4+0,1$  мм

была обогащена по традиционной для кварцитов методике, включающей стандартные операции очистки: постадийную магнитную сепарацию, с последующей очисткой в соляной и фтористоводородной кислотах, отмывку и сушку. Анализ обогащенной крупки фракции  $-0,4+0,1$  мм под электронным микроскопом, показал, что в основной массе чистых кварцевых зерен остаются единичные зерна со следами мусковитового цемента (рис. 7, г, д). Присутствие в концентрате мусковита подтверждается также данными рентгенофазового полуколичественного анализа. Согласно электронно-микроскопическим наблюдениям редкие микроминеральные включения циркона, рутила, ильменита на данной стадии очистки остаются внутри кварцевых зерен (рис. 7, е). Однако получить точные количественные сведения о химическом составе и качестве полученного концентрата позволит только прецизионный микроэлементный анализ крупки.

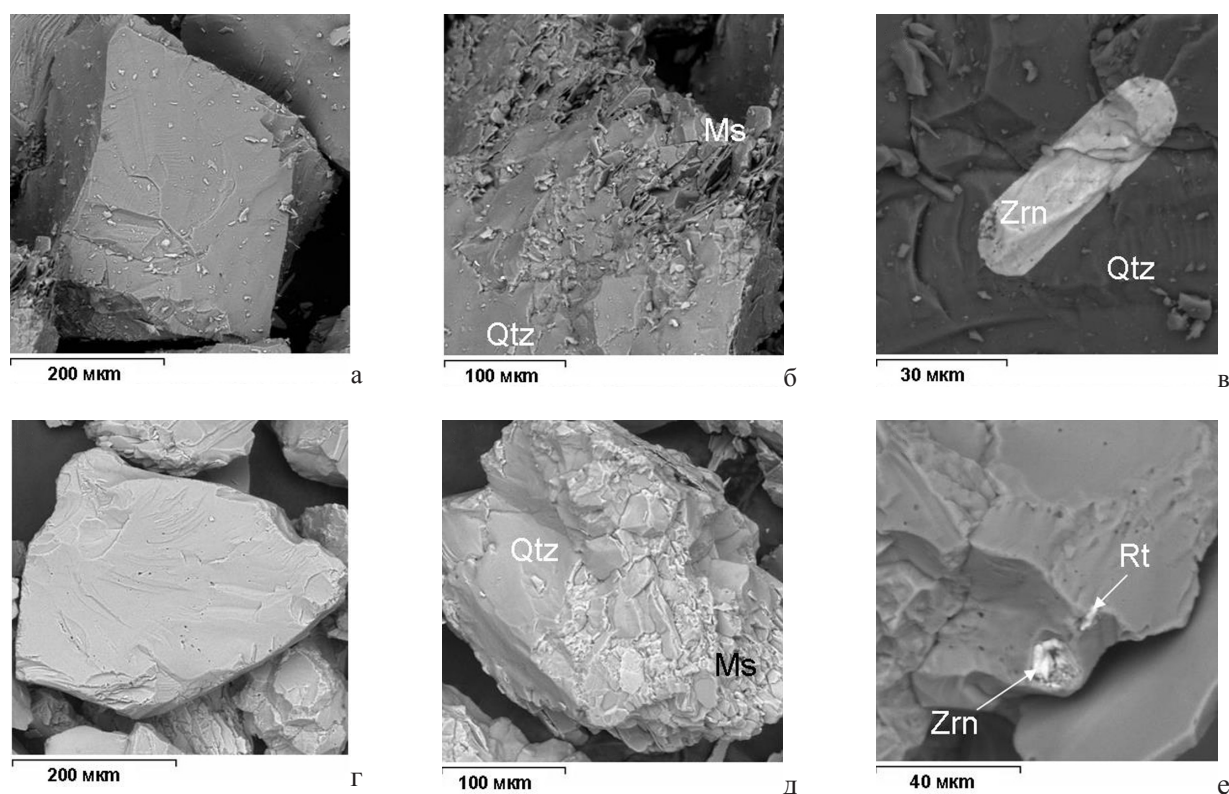


Рис. 7. Растровые изображения зерен (и фрагментов поверхности) кварцевой крупки

Верхний ряд – фракция  $-0,5+0,4$  мм, нижний ряд – обогащенный концентрат фракции  $-0,4+0,1$  мм:

а – чистое кварцевое зерно, б – фрагмент зерна кварца с мусковитовым налетом, в – включение циркона в кварце, г – чистое кварцевое зерно, д – зерно с незначительным количеством мусковита, е – включения циркона и рутила в кварце

Результаты минералогических исследований кварцито-песчаников Гирвасской площади показали, что они представляют собой породу, со-

стоящую, главным образом, из гранул кристаллического  $\alpha$ -кварца и мелкочешуйчатого мусковита, развитого преимущественно вдоль гра-

ниц кварцевых зерен. Основными аксессуарными минералами являются циркон, биотит, апатит, рутил, магнетит, ангидрит, монацит, приуроченные в основном к выделениям мусковита, но устанавливаемые также и внутри зерен кварца. Технологическими испытаниями обогащенности кварцито-песчаников установлено, что чистота кварцевой крупки существенно увеличивается с уменьшением размера фракции зерен. Ключевой проблемой в ходе очистки являются налеты мусковитового цемента, остающиеся в небольшом количестве на поверхности кварцевых зерен даже после операций обогащения. В дальнейшем при подборе и уточнении параметров обогащения кварцито-песчаников следу-

ет акцентировать внимание на особенностях загрязнения кварца мусковитом, определить возможность комплексного (кварц+мусковит) использования данных пород, а также рассмотреть варианты попутного извлечения редких металлов (Ce, La, Th, Y, Zr), что может привести к повышению рентабельности переработки пород и повышению комплексности использования минерального сырья.

*Работа выполнена в рамках проекта «Геологическая и минералого-технологическая оценка кварцевого сырья Карело-Кольской кварценовой провинции – нового перспективного региона России» Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 27.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Светова Е. Н., Скамницкая Л. С., Светов С. А. Минералого-геохимическая характеристика палеопротерозойских кварцевых конгломератов как нетрадиционного источника кварцевого сырья // Сборник статей по материалам VIII Российского семинара по технологической минералогии «Технологическая минералогия в оптимизации процессов рудоподготовки и обогащения минерального сырья». Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2014. С. 132–141.
2. Скамницкая Л. С., Данилевская Л. А. Выбор методов обогащения кварца на основе закономер-

ностей распределения и формы нахождения в нем примесей (на примере участков Меломайс и Фенькина–Лампи // Новые методы технологической минералогии при оценке руд металлов и промышленных минералов. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2009. С. 83–94.

3. Щипцов В. В., Скамницкая Л. С. Минералого-технологические особенности кварцевого сырья Карелии // Обогащение руд. 2000. № 3. С. 23–31.

4. Murata J., Norman M. B. An index of crystallinity for quartz // Am. J. Sci., 1976. V. 276. P. 1120–1130.

## ПОЛУЧЕНИЕ ЛИКВИДНОГО ВЕРМИКУЛИТОВОГО ПРОДУКТА ИЗ ТРУДНООБОГАТИМОГО СЫРЬЯ

*Кременецкая И. П.<sup>1</sup>, Рухленко Е. Д.<sup>2</sup>, Алексеева С. А.<sup>2</sup>, Веселова Е. Г.<sup>2</sup>, Лащук В. В.<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup> ИХТРЭМС КНЦ РАН, г. Апатиты, <sup>2</sup> ГИ КНЦ РАН, г. Апатиты*

Вермикулит – вторичный минерал, образующийся в результате гидратации флогопита и биотита, относится к сложным железомagneзиальным филлосиликатам группы смектитов. Потребительская ценность вермикулита связана с уникальным свойством данного минерала – способностью многократно увеличиваться в объеме при нагревании. Вермикулит применяют для изготовления теплоизоляционных изделий, в качестве заполнителя для легких бетонов и для приготовления штукатурных растворов специального назначения. Второе направление использования вспученного вермикулита обусловлено его адсорбционными и катионообменными свойствами.

В отличие от первых двух областей применения, использование термовермикулита в качестве компонента почвогрунтов в ряде случаев не требует жесткого соблюдения нормативов по содержанию примесей в товарном продукте. Например, авторами [1] показана целесообразность применения вспученного вермикулита в качестве гидропонного субстрата при создании травяной дернины на участках территории с высоким уровнем закисления и загрязнения тяжелыми металлами (ТМ). В настоящей работе рассмотрена возможность получения термовермикулита невысокого качества из засклавированных вермикулит-сунгулитовых отходов (ВСО) откры-



той добычи флогопита (ООО «Ковдорслюда», г. Ковдор, Мурманская обл.). Данные отходы занимают площадь более 10 га, содержат помимо породообразующих минералов сотни тысяч тонн вермикулита и сунгулита.

Ковдорское месторождение вермикулита, крупнейшее в мире, образовалось в результате изменения флогопитовых пород. Количественные и качественные характеристики вермикулита определяются, с одной стороны, условиями залегания коры выветривания, с другой – степенью флогопитизации щелочно-ультраосновных пород [2]. В зависимости от соотношения вермикулита, гидрофлогопита и сунгулита выделяют четыре типа руд, причем установлено, что высокое содержание сунгулита (не менее 10 %) отрицательно влияет на показатели процесса обогащения. Отметим, что термин «сунгулит» – это региональное название минерала лизардита из группы серпентина-каолина, который в течение многих лет традиционно используется при описании пород щелочно-ультраосновных интрузий Салма-Ковдорского пояса [3].

Результаты исследования состава ВСО показали, что данный материал по соотношению основных минеральных фаз относится к труднообогатимым рудам. Содержание вермикулита в отходах составило 13–14 %, сунгулита – около 10 %, пироксена, оливина и продуктов их разрушения – около 75 %.

Вермикулит в пробе находится в виде двух морфологических разновидностей: пакеты и пластины разной толщины (от 0,3–2 мм до 1–2 см) и мелкочешуйчатые агрегаты. Крупнопластинчатый вермикулит иногда содержит тонкие примазки и пятна сунгулита, мелкочешуйчатый чаще всего образует агрегаты с сунгулитом, включающие мелкие зерна диопсида, кальцита, оливина, титаномагнетита. Обогащение данных отходов осложняется наличием в пробе продуктов изменения первичных оливинитов в виде обломков пород темного цвета, кавернозного или рыхлого сложения, которые в более ранних исследованиях идентифицировали как отдельный минерал или смесь минералов под названием «иддингсит» [4, 5]. Детальное оптическое и рентгенографическое изучение показало, что окисленные обломки состоят из реликтов оливина и развивающихся по нему вторичных минералов: антигорита, оксигидроксидов железа, сидерита. В материале присутствует кальцит, в небольшом ко-

личестве содержатся примесь мелкочешуйчатого вермикулита и включения магнетита.

Основной причиной низких показателей обогащения такого сырья является трудность получения высокой степени разделения вермикулита и сунгулита, которые образуют плохо раскрываемые сростки и агломераты. В природоохранных технологиях, направленных на очистку загрязненных водных объектов и рекультивацию техногенного грунта, возможно совместное использование данных минералов, что и было учтено при разработке технологии обогащения ВСО.

При проведении исследований ориентировались прежде всего на возможность комплексного использования сырья с получением продуктов пусть не самого высокого качества, но при минимальных затратах и пригодных для реализации в природоохранных технологиях. Рациональная схема разделения сырья (ВСО) включает в себя дробление исходного продукта до крупности –3(5) мм, гравитационное обогащение в гидравлическом сепараторе с последующим электромагнитным обогащением песков сепаратора (рис. 1). В магнитной фракции концентрируются железосодержащие минералы и ожелезненные породы, а в немагнитной фракции и сливе гидравлического сепаратора целевые продукты – сунгулит и вермикулит.

В слив гидравлического сепаратора переходит около 34 % от исходного сырья. Он представляет собой мелкозернистый материал на 50 % состоящий из частиц менее 0,1 мм. Содержание вермикулита составляет около 20 %, причем он представлен мелкими тонкими листочками. Доля сунгулита составляет около 14 %, он попадает в слив преимущественно в виде свободных зерен. Данный материал может быть использован в качестве мелиоранта.

Магнитная фракция примерно на 95 % состоит из ожелезненных обломков пород и зерен магнитных минералов. Потери вермикулита и сунгулита с этой фракцией связаны в основной своей массе с разнообразными сростками – пироксеном, иддингситом или окислами железа. Выход магнитной фракции составляет более 53 % и данный материал может быть использован в качестве заполнителя мелкозернистого бетона.

В составе немагнитной фракции (нмф) вермикулит преимущественно представлен утолщенными пачками и широкими крупными листами и его содержание составляет порядка 37 %. Количество сунгулита составляет 25 %, из прочих примесей



преобладают обломки оливин-пироксеновых пород и щелочных сиенитов, а также обломки мине-

ралов – диопсида, кварца, полевого шпата. Выход нмф составляет около 13 %.



Рис. 1. Технология комплексного обогащения ВСО

В вермикулитсодержащем продукте наиболее богатыми по содержанию вермикулита являются классы крупнее 0,4 мм, где минерал представлен не только расщепленными пакетами, но и плотными нерасщепленными пачками и тонкими пластинками (рис. 2 а, б). Неполное расщепление объясняется особенностью исследуемого сырья, в котором вермикулит находится в тесной ассоциации с сунгулитом, отличается слабой вспучиваемостью при нагревании и низкой механической прочностью [7]. Основная доля примесей в этом продукте связана с материалом мельче 0,2 мм. Среди них встречаются обломки ожелезненных пород и минеральных зерен, в числе которых находится и сунгулит, ставший после обжига более легким.

Несмотря на проведенные операции обжига и воздушной сепарации, содержание вермикулита в сунгулитсодержащем продукте достигает 20 %. В крупных классах «задерживаются» сростки вермикулита с сунгулитом или другими минералами, а также плотные нерасщепленные пакеты слюды (рис. 3 а). В классах мельче 0,2 мм слюда представлена тонкими пластинками, часто изогнутой, остроугольной формы (рис. 3 б).

Таким образом, показана принципиальная возможность выделения вермикулитового продукта из ВСО. Задачей, тесно связанной с получением термовермикулита из продуктов обогащения ВСО, является использование сунгулитового компонента отходов в качестве прекурсора магнезиально-силикатного реагента. В связи с тем, что способ получения реагента предусматривает термоактивацию материала, причем оптимальная с точки зрения получения реагента температура обжига соответствует температуре аморфизации серпентиновых минералов, получены данные о влиянии температуры обжига на свойства образцов.

После термообработки нмф при различных температурах в течение 20 минут полученные продукты разделили на три фракции с размером частиц (1) менее 0,25 мм, (2) 0,25–2 мм и (3) более 2 мм. Так как в качестве агровермикулита целесообразно использовать наиболее крупную фракцию, дальнейшие исследования выполнены с использованием фракции +2 мм, обозначим данный материал как ВС (вермикулитовый субстрат).

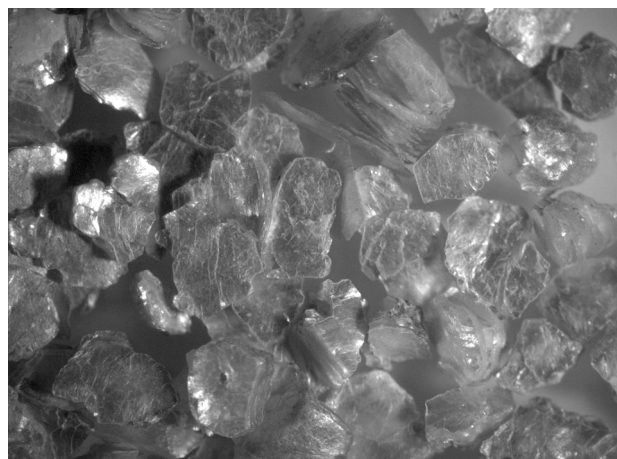
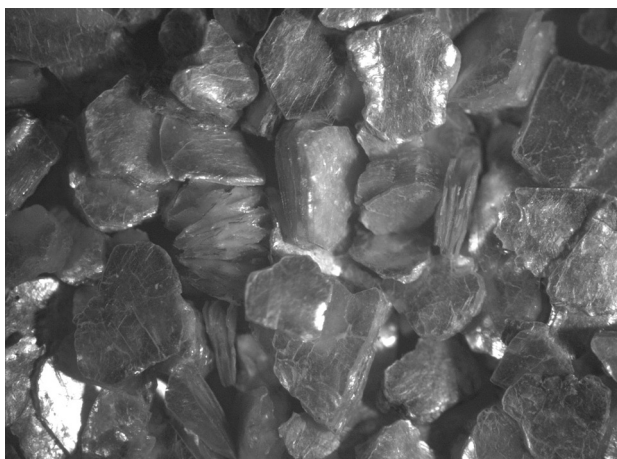


Рис. 2. Вермикулит в материале крупнее 0,63 мм: а – расщепленные и плотные нерасщепленные пачки; б – более тонкие пакеты и пластины, увеличение 12<sup>х</sup>

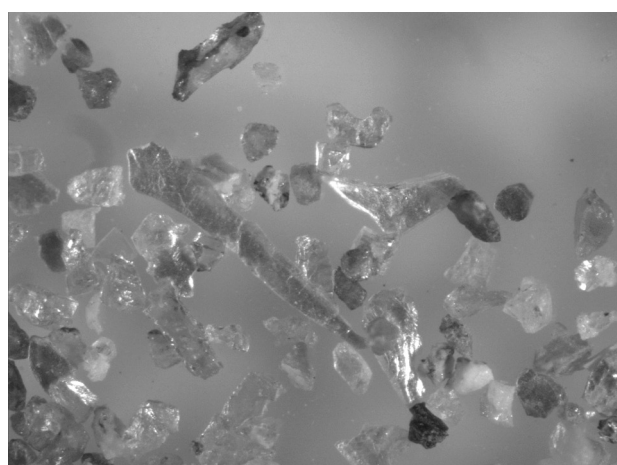
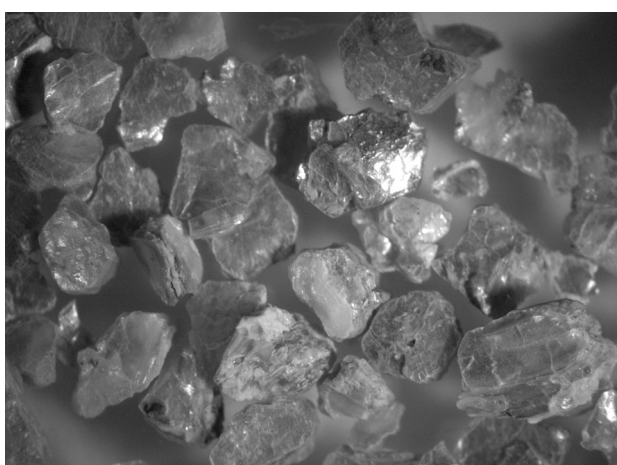


Рис. 3. Вермикулит, оставшийся в сунгулитсодержащем продукте: а – в сrostках с сунгулитом, железные пластины и плотные нерасщепленные пакеты, крупность +0,63 мм, увеличение 13<sup>х</sup>; б – остроугольные и изогнутые пластинки вермикулита в материале крупностью -0,2 +0,16 мм, увеличение 35<sup>х</sup>

На рис. 4 представлены зависимости активности образцов [8] и потерь при прокаливании при 1000°C от температуры обжига. Для сравнения приведены характеристики образцов термоактивированного сунгулита. Максимальная активность ВС, как и сунгулита, наблюдается в интервале температур обжига 600–750°C, причем ее величина для ВС составляет около 25 % от активности сунгулита. Принимая во внимание, что содержание сунгулита в ВС составляет также 25 %, можно сделать вывод, что активность образцов ВС определяется только присутствием в них сунгулита. Судя по данным о влиянии температуры обжига на величину остаточного содержания компонентов, удаляемых из образцов при температуре 1000°C, вермикулит является менее термоактивным минералом, по сравнению с сунгулитом, в интервале температур 600–800°C.

Важным показателем свойств ВС является значение pH суспензии. На диаграммах рассеяния значений pH и концентраций компонентов, входящих в состав исследуемых минералов (Si, Mg, K) и примесей (Ca) и представляющих интерес с точки зрения питания растений, представлены данные, полученные через сутки и месяц взаимодействия ВС с водой (рисунок 5). Помимо образцов ВС исследован образец ВК – вспученный вермикулит, полученный из вермикулитового концентрата (производство ООО «Ковдорслюда»). Последний материал характеризуется наименьшим значением pH (8–8,2). Интервалу pH 9–10 (сутки) (и 8,8–8,9 – месяц) соответствуют образцы ВС, полученные при температуре 550–700°C. В области наиболее высоких значений сгруппированы данные для образцов, полученных при повышенных температурах. В опытах с продолжительностью взаимо-

действия в течение суток для второй группы образцов наблюдаются повышенные по сравнению с ВК концентрации магния, а для третьей каль-

ция. Через месяц картина меняется и относительно ВК только для третьей группы концентрации магния несколько выше.

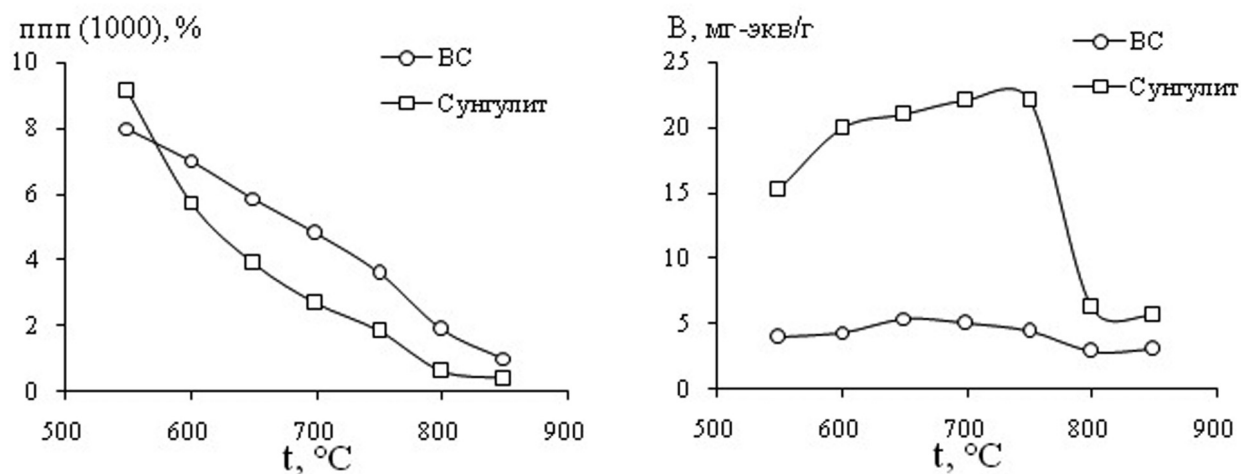


Рис. 4. Зависимость показателей активности (а) и потерь при прокаливании при 1000°C (б) образцов ВС и сунгулита

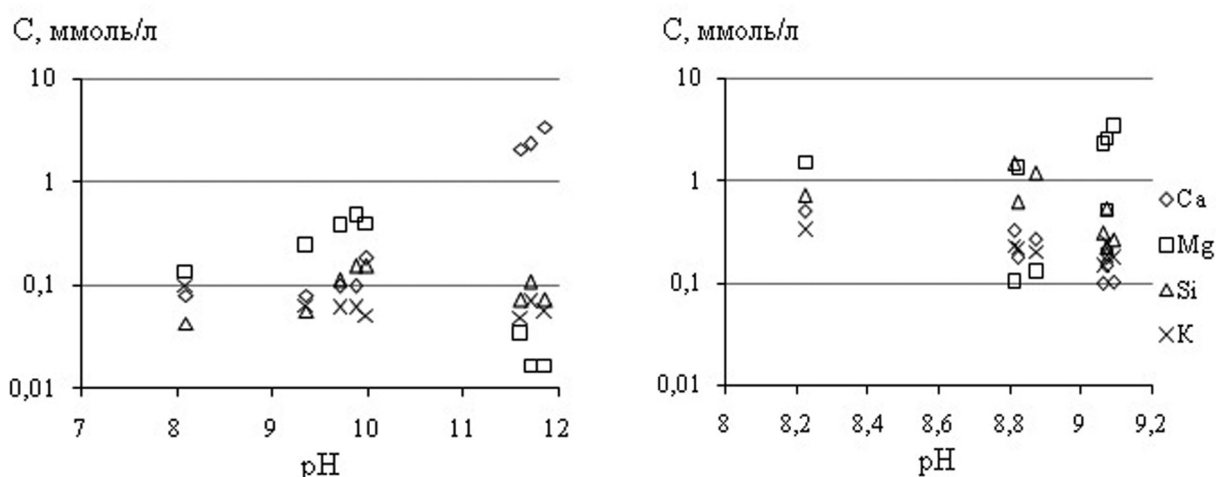


Рис. 5. Диаграммы рассеяния значений pH и концентраций компонентов в растворах выщелачивания вермикулитовых субстратов, продолжительность взаимодействия – 1 сутки (а) и 30 суток (б)

Процессы выщелачивания магния и кальция из ВС характеризуются наличием максимумов, причем для магния наибольшие концентрации наблюдаются для образца, термообработанного при температуре 650°C, продолжительность взаимодействия месяц, а для кальция – при 800°C, продолжительность взаимодействия сутки (рис. 6). Описанные закономерности можно объяснить присутствием в материале кальцита. Наличие кальция в растворе обусловлено растворением кальцита из образцов, полученных при низких температурах. При температурах выше 700°C начинает образовываться оксид кальция, растворимость которого су-

щественно выше, чем кальцита. В течение месяца в результате известного процесса поглощения щелочным раствором углекислого газа атмосферного воздуха происходит карбонизация оксида кальция с образованием карбоната кальция (кальцита), при этом растворимость кальция существенно снижается.

Магний, в отличие от кальция, в течение месяца высвобождается из активной фазы аморфизованного серпентина, однако повышения pH при этом не происходит, даже наоборот, щелочность суспензии несколько снижается. Специальные исследования систем на основе аморфизованных серпентиновых минералов показали, что дан-

ный процесс обусловлен трансформацией оксида магния в силикат магния. В то же время сравнение результатов, полученных в опытах с ВС, и данных для ВК (рис. 6) показывает, что наибо-

лее вероятной причиной повышенного значения pH для образцов ВС, полученных при температурах 600–700°C, является более высокая концентрация магния.

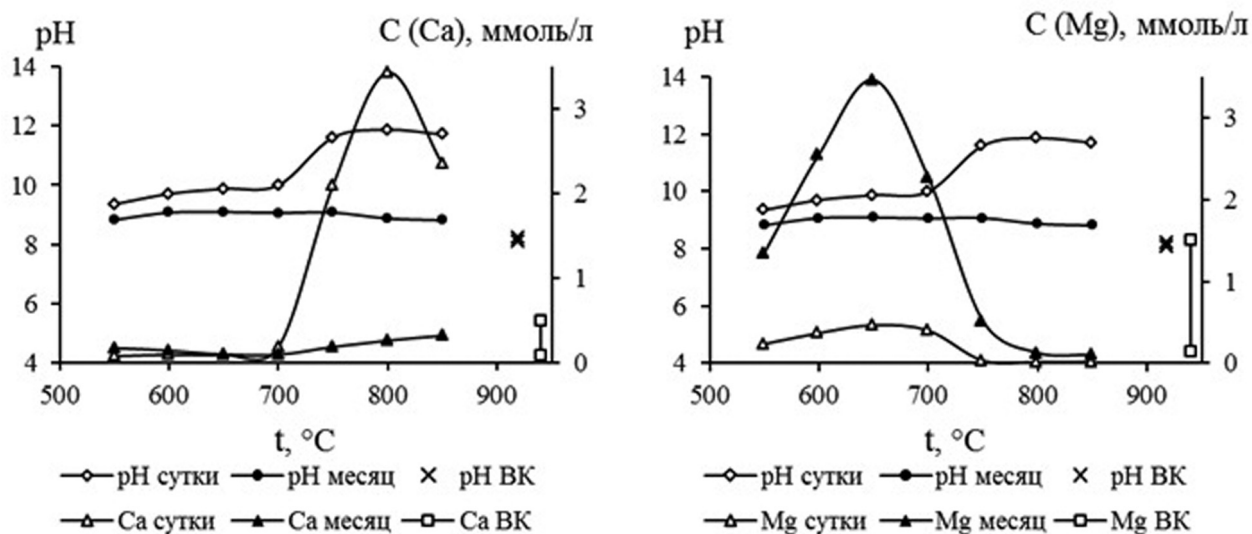


Рис. 6. Влияние температуры обработки вермикулитового субстрата на pH суспензий и концентрации магния (а) и кальция (б) в растворе

Поскольку присутствие магния в суспензиях образцов ВС, полученных в температурном интервале аморфизации серпентинов, обусловлено наличием метастабильной активной фазы, предпринята попытка уменьшить степень аморфизации серпентиновых минералов за счет уменьшения продолжительности термообработки, однако указанная мера не привела к заметному уменьшению pH суспензий. Результаты потенциометрического титрования суспензий ВС в воде показали, что для нейтрализации избыточной щелочности требуется 0,1 г-экв кислоты на 1 кг субстрата.

В технологиях рекультивации назначением вермикулитового субстрата является создание благоприятных режимов влажности, температуры и аэрации в среде прорастания семян [9]. По мере формирования культурфитоценоза вермикулитовый субстрат становится для растений источником питательных элементов, содержание которых определили по стандартной методике с использованием ацетатно-аммонийного буферного раствора (pH 4,7). Судя по полученным результатам (рис. 7), наблюдается тенденция небольшого увеличения содержания доступных магния, кремния и калия по мере увеличения продолжительности и температуры. Та же закономерность установлена для никеля, который входит в состав серпентиновых минералов. В то же

время на содержание доступного кальция интенсивность температурного воздействия влияния не оказывает, что свидетельствует о его нахождении в составе соединения, не активного при температурах опытов – кальцита, т. е. подтверждает описанные выше закономерности по выщелачиванию данного элемента. Аналогичные результаты получены для меди, которая в породах Ковдорского массива находится в ассоциации с кальцитом. Отметим что для ВК, в котором отсутствует заметное количество примесей, содержание доступных компонентов ниже, чем в ВС, и составляет, мг/г, 170 (Mg), 20 (Si), 3 (K).



Рис. 7. Влияние температуры и продолжительности термообработки на содержание доступных компонентов в образцах вермикулитового субстрата (температура обжига указана на графике)



В результате выполненных исследований предложен способ получения вермикулитового гидропонного субстрата из отходов добычи флогопита, свойства которого имеют некоторые отличия от характеристик стандартного вермикулитового концентрата. С целью уточнения при-

годности ВС для выращивания растений образцы материала переданы для испытания в лабораторию Полярно-альпийского ботанического сада-института им. Н. А. Аврорина, в которой разрабатываются технологии создания культурфитоценозов на загрязненных территориях.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. 2484613 РФ, МПК A01B 79/02, B09C 1/00 (2006. 01). Способ создания почвенно-растительного покрова при рекультивации нарушенных земель / Иванова Л. А., Горбачева Т. Т., Корытная О. П. и др.; Полярно-альпийский ботанический сад-институт Кол. науч. центра РАН. № 2011127453/13; заявл. 04.07.2011; опубл. 20.06.2013, Бюл. № 17.
2. Мельников Н. Н., Бусырев В. М., Гершенкоп А. Ш., Пучка В. Д., Черемных Г. В. Слюдяные месторождения Мурманской области: реальность и возможность освоения. – Апатиты, Изд-во КНЦ РАН, 1998. – 189 с.
3. Афанасьев Б. В. Минеральные ресурсы щелочно-ультраосновных массивов Кольского полуострова. – СПб: Изд-во «Роза ветров», 2011. – 224 с.
4. Каледонский комплекс ультраосновных, щелочных пород и карбонатитов Кольского полуострова и Северной Карелии / А. А. Кухаренко, М. П. Орлова, А. Г. Булах и др. М.: Недра, 1965. – 549 с.
5. Флейшер М. Словарь минеральных видов. М.: Мир, 1990. – 150 с.
6. Кременецкая И. П., Беляевский А. Т., Васильева Т. Н., Корытная О. П., Макарова Т. И. Амorfизация серпентиновых минералов в технологии получения магнезиально-силикатного реагента для иммобилизации тяжелых металлов // Химия в интересах устойчивого развития. 2010. Т. 18. С. 41–49.
7. Т. П. Карасева, А. Ш. Гершенкоп, В. Ф. Сычук. Обогащение вермикулитовых руд. Л.: Наука, 1972. 140 с.
8. Кременецкая И. П., Корытная О. П., Васильева Т. Н. Реагент для иммобилизации тяжелых металлов из серпентинсодержащих вскрышных пород // Водочистка. Водоподготовка. Водоснабжение, 2008. № 4. С. 33 – 40.
9. Иванова Л. А., Горбачева Т. Т., Слуковская М. В., Кременецкая И. П., Иноземцева Е. С. Инновационные технологии рекультивации нарушенных земель // Экология производства, 2014. № 2. – С. 58–68.

## МЕТОД РЕНТГЕНОВСКОЙ (МИКРО)ТОМОГРАФИИ В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МИНЕРАЛОГИИ: MORFOСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ

**Якушина О. А.<sup>1,2</sup>, Ожогина Е. Г.<sup>1</sup>, Хозяинов М. С.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>ФГУП «ВИМС им. Н. М. Федоровского», г. Москва;

<sup>2</sup>ГБОУ ВПО МО «Международный университет Дубна», г. Дубна

Задача исследования минерального вещества – получить наиболее полные, достоверные данные о морфоструктурных характеристиках, т. е. текстурно-структурных и фазовом (минеральном) составе, выявить взаимосвязь этих параметров с технологическими свойствами руд, обосновать выбор схемы обогащения.

Сегодня в промышленную переработку вовлекаются тонкодисперсные и бедные руды, в которых рудные минералы имеют достаточно сложные морфоструктурные характеристики: не только тесные сростания рудных фаз как с пороодообразующими минералами, так и между собой, неравномерным, нередко тонким гранулярным составом, а также неоднородностью

зерен рудных минералов. Эти факторы негативно влияют на раскрытие полезных минералов в процессе дезинтеграции руды. Специфические особенности состава и строения таких руд создают определенные методические трудности в определении их морфоструктурных характеристик. В целях получения наиболее полной и достоверной информации о минеральном составе, который определяет качество сырья, особенно-сти, характеристики и поведение минеральных фаз в технологических процессах, необходимо всестороннее детальное изучение вещественного состава и морфоструктурных параметров природного и техногенного сырья. Важно иметь технологии, которые позволяют оперативно и

экономично проводить прогнозную оценку качества сырья.

В последние годы активно расширяется применение метода вычислительной рентгеновской томографии (РТ/СТ), как лабораторного метода исследования руд и пород. Вычислительная, или компьютерная, томография, Computed Tomography (СТ), – метод восстановления внутренней структуры объекта по проекционным данным (цифровым снимкам объекта, сделанным с разных точек) с помощью математических методов и алгоритмов, основан на преобразованиях, впервые предложенных австрийским математиком И. Радоном (1917 г.). В вычислительной томографии в принципе могут использоваться разные источники возбуждения сигнала, одним из которых является рентгеновское излучение, и этот вид томографии называют в медицине КТ, а в промышленной томографии РТ, РВТ, ПРВТ (англ. X-ray CT, ХСТ). Микротомографию, т. е. когда используют микрофокусные рентгеновские трубки (обеспечивают более высокое пространственное разрешение), за рубежом называют томографией высокого разрешения High-resolution X-ray computed tomography.

Известно, что величина линейного коэффициента ослабления рентгеновского излучения (ЛКО)  $\mu$  см<sup>-1</sup> определяется химическим составом и плотностью для данной энергии гамма-излучения:

$$\mu = \mu_m \cdot \rho, \quad (1)$$

где  $\mu_m$  – массовый коэффициент ослабления гамма-излучения рассматриваемого вещества при той же энергии, см<sup>2</sup>/г;  $\rho$  – плотность вещества, г/см<sup>3</sup>. Для вещества сложного химического состава величина  $\mu_m$  является суммой вкладов его компонентов.

Метод рентгеновской вычислительной томографии (РТ), относительно новый метод в практике исследований для решения задач технологической минералогии. Большинство современных лабораторий при изучении вещественного состава пользуются в основном стандартным набором методов: оптико-минералогический, рентгенографический и фазовый элементный (химический), то практическое применение метода РТ может повысить оперативность и эффективность исследований.

Среди преимуществ метода РТ укажем следующие: неdestructивность – предварительная подготовка (пробоподготовка) образца для ана-

лиза не требуется, исследование проводится в естественной взаимной ориентации слагающих фаз; экспрессность – рядовой анализ проводится за единицы минут, возможность трехмерной визуализации внутренней структуры объекта; чувствительность рентгеновской томографии к локальным неоднородностям в десятки раз больше, чем рентгенографии (радиографии). Обычные рентгеновские изображения отражают проекционное наложение сложных структур, т. е. их суммарную рентгеновскую тень. Пространственное разрешение современных томографов, в зависимости от вида модели и при размере исследуемого объекта меньше 10 мм, составляет единицы микрометров (у некоторых моделей – единицы нанометров при размере объекта <1мм). Присутствие минералов с близкими оптическими характеристиками, тонкодисперсных или слабо окристаллизованных, «рентгеноаморфных» фаз не является ограничением метода.

Изображения томограмм визуализируют (устанавливают) размеры и характер распределения фаз в тонком плоском слое исследуемого объекта, т. е. позволяют получать данные о морфоструктурных особенностях минерального вещества, по которым можно прогнозировать качество, технологические свойства сырья и его поведение в процессах переработки.

Применять РТ как инструмент исследования горных пород и руд в России было предложено и начато в 1990-х гг. [1, 2]. Для этого была специально сконструирована отечественная аппаратура – микротомограф ВТ-50-1–«Геотом» (ООО «Проминтро»). Исследование минерального вещества для получения технологической информации о природном или техногенном сырье имеет задачей определение морфоструктурных характеристик (в т. ч. количественных), т. е. *фазового* (минерального) состава и *текстурно-структурных* характеристик. Надо было разработать методику РТ исследования геообъектов. Подчеркнем *различие* промышленных (РТ) и медицинских (КТ) рентгеновских томографов и методик томографии. Исследуются принципиально различные по способности ослабления рентгеновских лучей вещества: металлы, сплавы, композиты и биологические ткани. Используются разные диапазоны рабочих энергий, соответственно, и разные эффекты взаимодействия с веществом (200–500 кэВ до МэВ и Комптон-эффект для РТ, от 17 до 100 кэВ при основном 20–25 кэВ и фотоэффект для КТ); разные технические решения гео-

метрии сканирования (РТ вращается исследуемый объект, КТ он неподвижен); Разные режимы (РТ импульсный и КТ непрерывный); дозы облучения и рабочие площади сканирования. Отличаются и задачи исследования – в медицине, КТ живых организмов и биологических тканей, томограммы анатомических структур (органов) анализируются прежде всего на предмет наличия/отсутствия патологии. Биологические ткани (мышцы, кровь, кости), в состоят (до 60 %) из связанной воды и слабо поглощают рентгеновские лучи, тогда как минералы – достаточно сильно. *Справочно:* для энергии 100 кэВ,  $I=100$  мА для крови, мышечной ткани и костной ткани  $\mu$ , составляет 0,178, 0,180 и 0,48 см<sup>-1</sup> ( $\mu$  воздуха=0), лишь  $\mu$  некоторых минералов близко  $\mu$  костной ткани: 0,44 кварц, 0,53 кальцит, и значительно выше для рудных минералов ~1,5 – сульфиды (пирит, сфалерит) и оксиды (магнетит), 6,1 барит; у металлов 2,91 железо, 14,9 серебро, 62,6 свинец, 98,6 золото.

Нами было предложено проводить идентификацию элементов микронеоднородности путем сопоставления отношений амплитуд ЛКО ( $\alpha_j$ ), установленных на томограмме (эксперимент) для фазы и образца сравнения (как правило *алюминий*, плотность которого наиболее близка к плотности силикатов и алюмосиликатов, основных минералов, слагающих земную кору) – с теоретически рассчитанными для них отношениями эффективных величин ЛКО ( $\alpha_j$ ):

$$\alpha = \mu_{эф}^x / \mu_{эф}^{oc}, \quad (3)$$

Именно этот методический прием позволяет проводить автоматическую идентификацию фаз и отличает представленную работу от известных. Он позволяет сопоставлять измерения, проведенные при разных режимах съемки, для идентифицируемых фаз разных размеров, при меняющемся вещественном (минеральном) составе вмещающей среды (горной породы, минерального агрегата) – «геологическом фоне» образцов. Расчет проводят в предположении, что химический состав и плотность идентифицируемой фазы известны. Близость отношений измеренных амплитуд и рассчитанных величин ЛКО для идентифицируемой фазы и образца сравнения с большой степенью вероятности будет свидетельствовать о правильности предположения относительно минерального состава диагностируемых фаз изучаемого объекта. Известные данные о морфологии минеральных образований, их размерах, кристаллографических формах, другая

априорная информация позволяют повысить надежность идентификации фаз и морфоструктурных особенностей.

Экспериментальные исследования геообъектов проведены нами на отечественном рентгеновском микротомографе ВТ-50–1 «Геотом» (Проминтро, Россия): средняя энергия нефльтрованного излучения ~100 кэВ, достаточная для просвечивания минеральных объектов, обеспечивается преобладание фотоэффекта при взаимодействии гамма-квантов с веществом, когда величина ЛКО зависит от атомного номера элемента, т. е. состава вещества. Условия съемки: микрофокусный рентгеновский источник РЕИС-150М, с электростатической и магнитной системами фокусировки электронного пучка; воздушное охлаждение мишени, рабочее напряжение рентгеновской трубки  $U=100$  кВ, ток накала  $I=2,9$  А; блок детекторов 8 каналов со сцинтилляторами CsJ(Na), веерная геометрия сканирования, шаг 3 мкм. Изучают объекты диаметром до 1,5 см и высотой до 5–7 см. Предел пространственного разрешения 5 мкм, диапазон значений томограммы в шкале условных единиц от – 32767 до 32768 в десятичной системе счисления.

Методом РТ были исследованы разные виды природного и техногенного минерального сырья – минералы, их агрегаты, руды черных и легирующих металлов, океанические руды, ископаемые угли, алмазоносные породы и алмазы, шунгитовые породы, техногенное сырье (металлургические шлаки, окатыши), уникальные объекты (лунный грунт, метеориты). Исследованиями показали возможность применения томографа как средства признаков разделения для экспрессной разбраковки рудосодержащих кусков от пустой породы [2–3]. Разработана схема РТ проведения анализа (рис. 1).

Для осадочных карбонатных марганцевых руд Тыньинского месторождения методом РТ был решен технологический вопрос: показано, что хотя в исходной руде имелось значительное содержание слоистых (глинистых) минералов, но с уменьшением крупности зерен различие в фазовом составе исходной и «мытой» руды нивелируется, и при размере 1 мм, глинистого материала сохраняется примерно одинаково, т. е. можно не применять операцию «отмывания» руды.

РТ в начале лабораторных исследований руд Сейбинского рудного узла выявила особенности, и характер взаимоотношения рудообразующих минералов: практически равномерная тонкая вкрапленность кварца и гидроксидов желе-



за в рудном марганцевом агрегате, что показало невозможность применения физических методов обогащения, характер взаимоотношения марганцевых фаз определил невозможность селективного разделения конкретных марганцевых минералов, учитывая близость их физических свойств. Визуально зерна рудных минералов всех классов крупности выглядели одно-

родными, но РТ установил, что это пиролюзит-псиломелановые агрегаты – гидроксиды марганца, в результате окисления, образуют тонкую оболочку на поверхности зерен. Установленные особенности строения руд влияют на технологических свойствах руды и качество продуктов: перспективны именно методы химического обогащения.

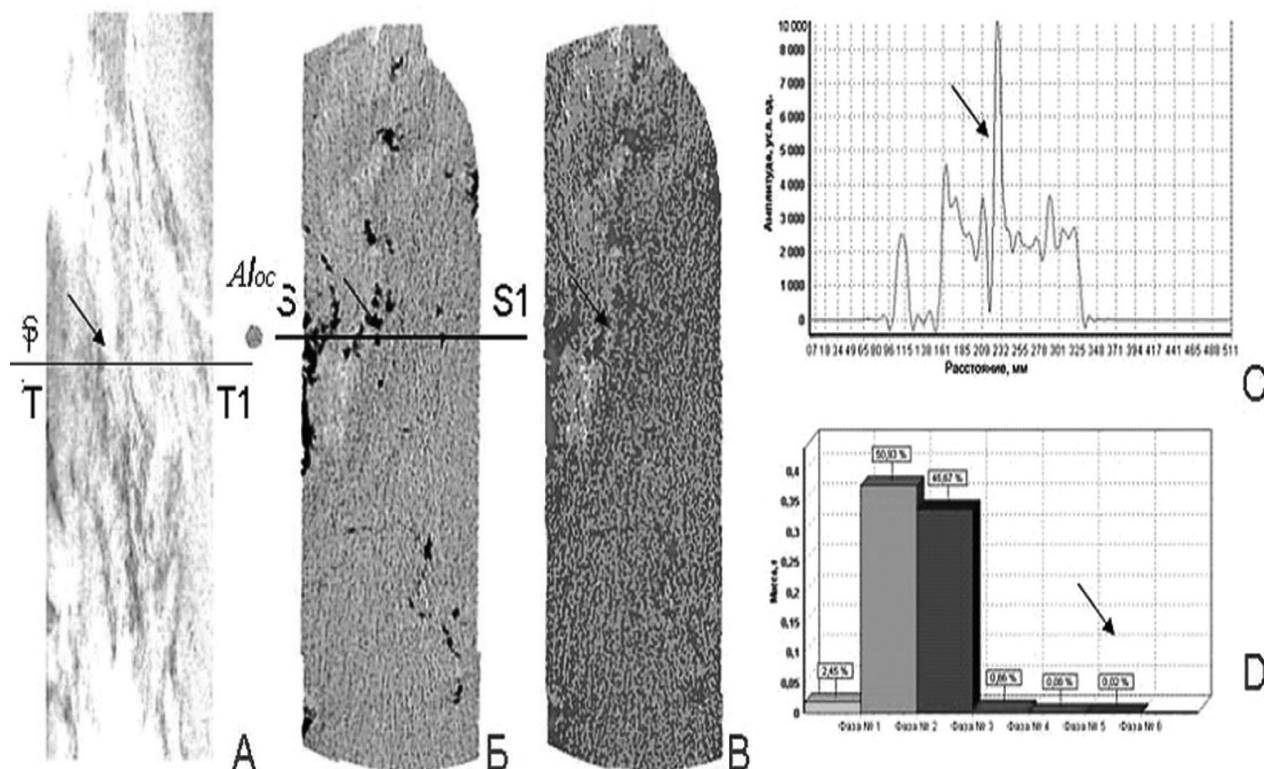


Рис. 1. РТ-анализ, здесь и далее: А – рентгенограмма, Б – томограмма по сечению Т–Т1 (ОС – А1), В – обработка по «TomAnalysis», С – профиль ЛКО по линии S – S1, D – гистограмма % соотношения фаз

Использование РТ позволило решить вопрос о минеральной форме фосфора и особенностях ее микростроения в марганцевых рудах Порожинского месторождения. Методом РТ были исследованы отобранные под стереоскопическим бинокулярным микроскопом желваки, имевшие по данным РФА апатит-кварцевый состав и содержавшие рентгеноаморфную фазу. Выяснилось, что апатит совместно с опалом и кварцем образует тонкодисперсные агрегаты, сохраняющие кристаллографическую псевдогексагональную форму, причем внешняя оболочка таких агрегатов толщиной до 100 мкм всегда сформирована опалом, который «маскирует» собственно апатит. Это позволило объяснить невозможность селективного выделения апатита в технологических процессах методами рентгено-радиометрической сепарации и флотации.

Оценка качества марганцевой руды рудопро-явления Кипчакское. Исходная проба, представленная рыхлым землистым материалом с редкими кусковатыми агрегатами была разделена на три технологических типа на основании данных химического анализа. РТ анализ, выполненный до детальных исследований другими минералогическими методами, показал, что марганцевая руда всех трех типов имеет полиминеральный состав и неоднородное строение (рис. 2). Во всех пробах руды выделяется не менее 15 фаз. Пористость рудных агрегатов в пробах руды 1 и 2 не превышала 5 %, а в 3 пробе достигает 10 %. Кусковатые агрегаты зерен слабо сцементированы. Цементирующий материал оптическими методами определить не представляется возможным, поскольку для приготовления оптических препаратов (шлифы, аншлифы) рудные агрега-



ты проваривались в канифоли. По данным РТ цемент состоит из слоистых алюмосиликатов, карбонатов, рыхлых гидроксидов Fe и Mn.

Исследование специально отобранных зерен рудных минералов показало (рис. 2Б), что они во всех пробах неоднородны, имеют псиломелан-пирролюзитовый состав. Зерна, одинаково выглядывшие под стереоскопическим бинокулярным микроскопом, являются обломками раз-

ных минералов – пирролюзита или псиломелана. В зернах марганцевых минералов из 1 пробы руды отмечаются включения порообразующих минералов, содержание которых не превышает 5 %. В зернах марганцевых минералов из 2 пробы содержание включений порообразующих минералов достигает 10–12 %. В зернах рудных минералов из 3 пробы руды включений порообразующих минералов не обнаружено.

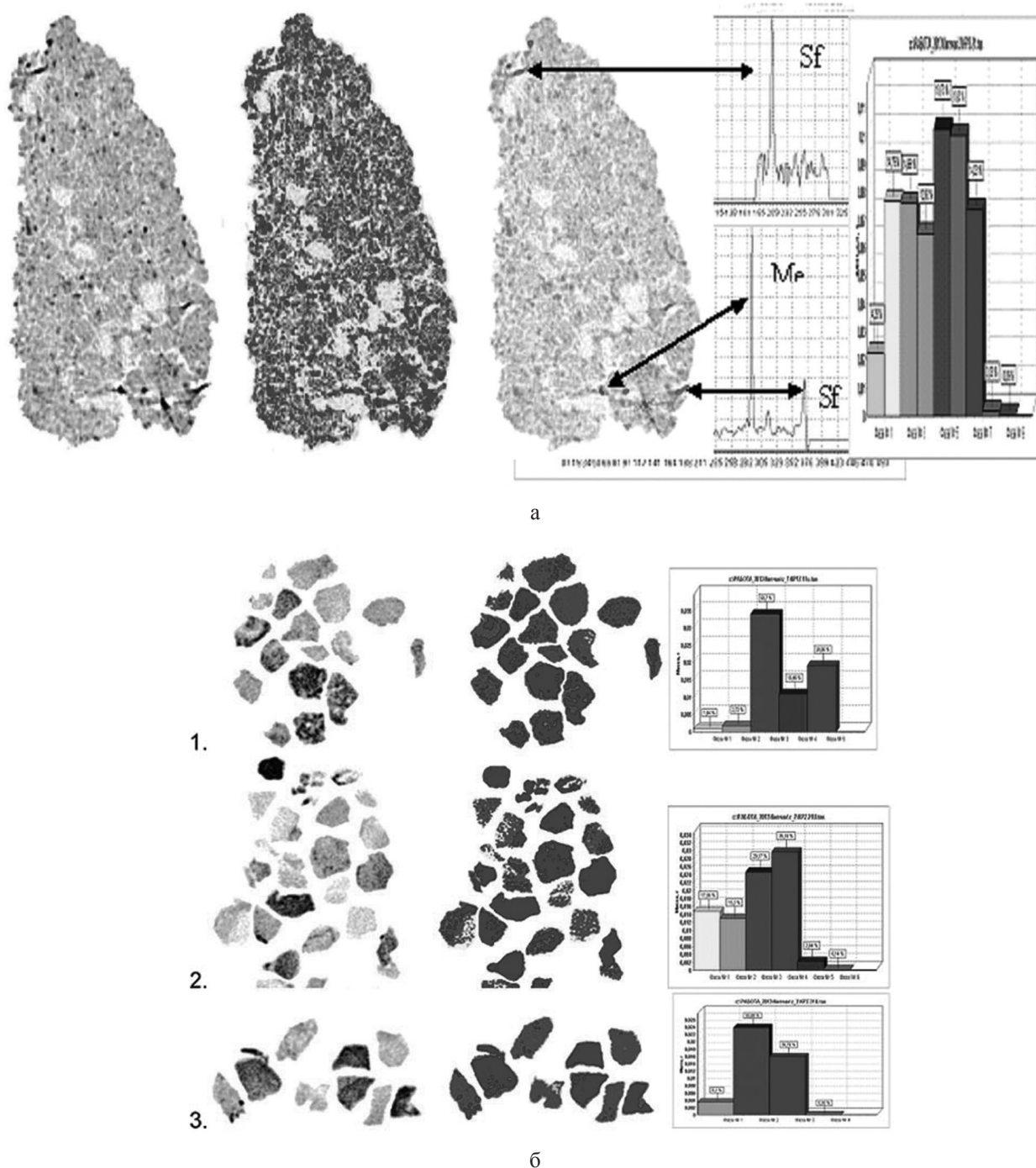


Рис. 2. РТ исходной руды (А) и технологических продуктов трех типов (Б) рудопроявления Кипчакское, 10 мм. Стрелкой показаны фазы сульфидов металлов

Характеристики и особенности минералов марганцево-железных руд Кипчакского рудопроявления, оперативно установленные по РТ и подтвержденные оптико-минералогическим исследованием, позволяют говорить о неэффективности механических методов обогащения. Вероятно, селективного разделения рудных минералов железа и марганца достигнуть не удастся, также как и получения продуктов необходимого качества. Перспективы технологической переработки этих руд следует связывать с металлургическим переделом.

При прогнозировании качества техногенного минерального сырья (шлаков, окатышей, лежащих хвостов металлургического передела) необходимо учитывать их существенные отличия от природных руд по составу и свойствам. Среди специфических особенностей состава и строения – макроскопическая однородность; гранулярный состав рудных фаз и сложный характер их срастаний как между собой, так и нередко со шлакообразующим материалом, приводящий к обра-

зованию ультратонких полиминеральных агрегатов; присутствие значительного количества рентгеноаморфных фаз; широко развитый изоморфизм минералов группы шпинелей, которые достаточно часто являются главными рудными минералами. Так, рудная составляющая исследованных шлаков представлена непрерывным изоморфным рядом шпинель-магнетит-хромит, и на томограммах наблюдалось пятнистое, каемчатое сложение агрегатов явно вторичного, техногенного происхождения (рис. 3). Эвтектические колонии, четко различимые на томограммах, являются подтверждением одновременного присутствия магнетита двух разновидностей. Отсюда следует прогноз технологических свойств железосодержащих шлаков, что использование физических методов обогащения будет неэффективным. Целесообразно использовать химические методы, принимая во внимание гетерогенное строение основных рудных фаз и их агрегатов, характер их распределения и морфоструктурные характеристики.

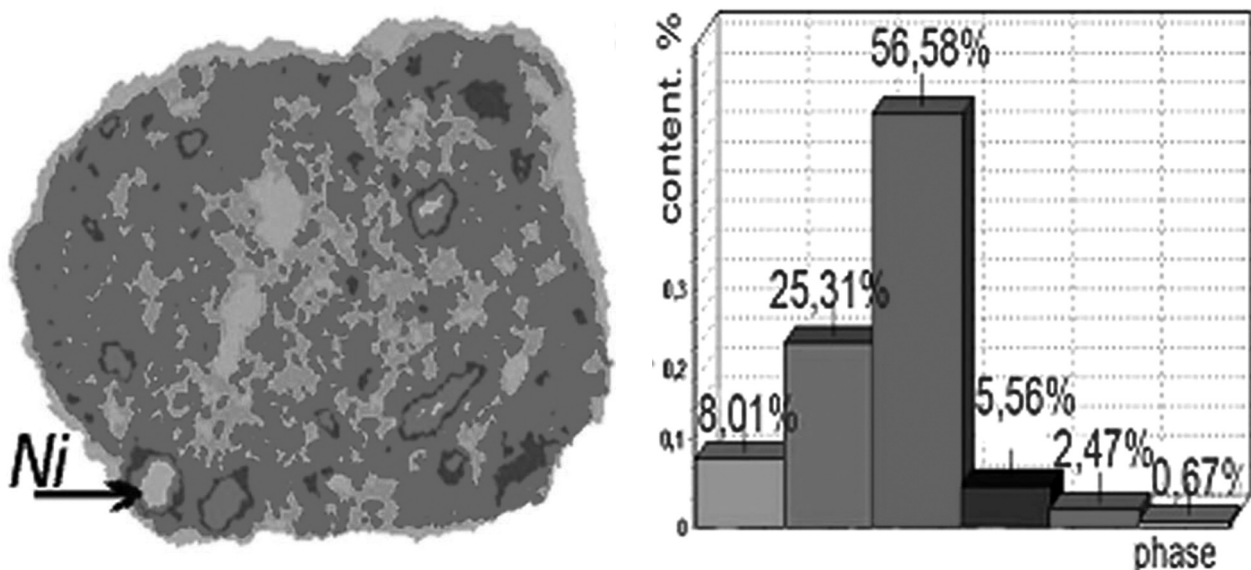


Рис. 3. Металлургический шлак  $1,5 \times 2$  мм,  $\mu$ РТ и гистограмма % соотношения фаз, слева направо оливин, 2 разные эвтектические колонии магнетита, треворит, никель (стрелка)

Сегодня разные группы исследователей за рубежом и в нашей стране [3–5] ведут активные разработки в области применения РТ в геологии и смежных областях знаний. Наш опыт показывает, что метод РТ, с привлечением минералого-петрографических данных, позволяет получать важную технологическую информацию и свойства сырья, прицельно выполнять последующие прецизионные анализы, и, тем самым, успешно решать задачи технологи-

ческой минералогии, в том числе, труднообогащаемых руд. Использование РТ в комплексе физических методов исследования позволяет повысить эффективность минералогического обеспечения поисково-разведочных работ, оценки качества сырья и разработки технологических схем его переработки, в соответствии с требованиями рационального природопользования и обеспечения экологического благополучия среды обитания человека.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Хозяинов М. С., Руб А. К., Козорезов Е. В. Использование рентгеновской вычислительной микротомографии в прикладной минералогии // ДАН, 1995. № 4. С. 516–519.
2. Якушина О. А., Ожогина Е. Г., Хозяинов М. С. Рентгеновская томография – неразрушающий метод структурного и фазового анализа // Мир измерений. 2003. № 10. С. 12–17.
3. Yakushina O. A., Iospa A. V., Ozhogina E. G., Khozyainov M. S. Fast metal-bearing ores washability projection on X-ray Computed Tomography data / Proceedings of the XV BMPC, Bulgaria 12–16 June 2013, Sofia, 2013, in 2 Vol. Vol. 1. P. 117–119.
4. Yakushina O. A., Ozhogina E. G., Khozyainov M. S. Fast metal-bearing ores washability projection on X-ray Computed Tomography data / 1st International Conference on Tomography of Materials and Structures: Book of Abstracts (Ghent, 01–05 July 2013). Ghent, 2013. Part 2. P. 301–304.
5. Veerle C., Boone M. N. High-resolution X-ray computed tomography in geosciences: a review of the current technology and applications // Earth-Science Reviews / Elsevier, 2013. Vol. 123, August 2013, P. 1–17; doi: 10.1016

## МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ГЛИНИСТОГО СЫРЬЯ

*Лыгина Т. З., Трофимова Ф. А., Губайдуллина А. М.*

*ФГУП ЦНИИГеолнеруд, г. Казань*

Глинистые минералы – высокодисперсные и относительно стабильные соединения групп водных силикатов слоистого или цепочечного строения, образовавшиеся преимущественно в процессе химического выветривания горных пород. Высокая дисперсность таких минералов, а отсюда и специфичность их свойств достигается благодаря особенностям кристаллохимического строения, и, в первую очередь, – способности базальных граней микрокристаллов активно взаимодействовать с молекулами воды.

Глинистые дисперсии относятся к гидрофильным системам. Глины энергично взаимодействуют с водой, и частицы ее за счет сил молекулярного сцепления покрываются адсорбционной пленкой воды.

Физико-химические свойства глинистых и цементных суспензий во многом определяются протекающими в них ионообменными и адсорбционными процессами. Глинистые промывочные жидкости и цементные растворы могут коагулироваться под влиянием различных факторов: добавления электролитов, изменения температуры, изменения содержания твердой фазы. Устойчивость глинистых растворов к действию электролитов достигается с помощью высокомолекулярных веществ.

Глинистые частицы в сухом виде электронейтральны, так как анионы алюмосиликатного ядра полностью компенсируются положительными

катионами. В водной среде, для которой характерна большая диэлектрическая проницаемость, связь катионов с алюмосиликатным ядром ослабевает, и они легко диффундируют от границы раздела в дисперсионную среду, в результате образуется двойной электрический слой. При взаимодействии с водой молекулы двуокиси кремния, находящиеся на поверхности, гидратируются и образуют кремнекислоту, которая диссоциирует с образованием потенциалопределяющих ионов  $\text{SiO}_3^{2-}$ . Наличие таких ионов обуславливает отрицательный заряд поверхности, а катионы переходят в раствор, образуя второй слой двойного электрического слоя.

Наличие в поверхностном слое глинистых частиц тех или иных ионов, которые способны образовывать сольваты, определяет свойства глин и глинистых дисперсий (вязкость, набухание, ионный обмен и т. д.). Электрокинетический потенциал суспензии глины равен ~49 мВ.

Наиболее специфичным свойством глинистых минералов является их способность образовывать водные дисперсии, обладающие коагуляционной структурой, в которой дисперсная фаза, удерживается тонкими прослоями дисперсионной среды. С наличием этих прослоек связано важное свойство коагуляционных структур – тиксотропия. Тиксотропия – очень ценное, с практической точки зрения, свойство глинистых дисперсий, благодаря которому они, нахо-

дась в покое, способны удерживать во взвешенном состоянии утяжелитель и выбуренную породу в виде шлама. В то же время они достаточно легко прокачиваются буровыми насосами.

Для бурения представляют интерес четыре группы глинистых минералов:

- 1) монтмориллонит (бентонитовые глины),
- 2) палыгорскит (сепиолит), 3) каолинит, 4) гидрослюда.

Поскольку поверхностная активность глин различного структурного типа формируется по-разному, то вполне логично ожидать большего эффекта при дезинтеграторной обработке глин с жесткой структурой (палыгорскит, каолинит, гидрослюда)

Нами проводились исследования влияния режима дезинтеграторной обработки на технологические свойства глин различных месторождений. Анализ экспериментальных данных показывает, что по сравнению с комовой глиной, применявшейся при бурении, дезинтеграторная технология позволяет при оптимальном режиме снизить критическую концентрацию структурообразования. Это достигается за счет роста удельной поверхности и ее активации при обработке глины в дезинтеграторе. Оценивалось влияние режима работы дезинтегратора и влажности глины на степень ее измельчения и на свойства глинистой суспензии. Выявлено, что увеличение влажности глины улучшает технологические свойства глинопорошка, несмотря на снижение удельной поверхности на 15–25 %. Это связано с повышением содержания в глинопорошке аморфного кремнезема, который при растворении формирует кремниевые кислоты, улучшающие структурно-реологические и фильтрационные свойства, благодаря способности их к полимеризации и адсорбции.

Наиболее распространенными глинистыми породами, используемыми для бурения, являются бентонитовые глины.

Различия вещественного состава бентонитов разных геолого-промышленных типов порождают различия их физических и, как следствие, технологических свойств, что предопределяет необходимость диагностики их качества по совокупности минералогических, кристаллохимических, физико-химических характеристик рациональным комплексом методов исследования.

К наиболее информативным и показательным критериям качества бентонитового сырья отнесены содержание монтмориллонита, а так-

же структурно-кристаллохимические особенности, отражающие специфику минерального состава межслоевых катионов и силикатных слоев минерала.

При количественной оценке глинистых минералов приходится сталкиваться с большими трудностями, связанными главным образом, с высокой дисперсностью кристаллов этих минералов. В связи с этим, определение минерального состава по содержанию монтмориллонита, анализ структурного типа и структурно-кристаллохимических особенностей монтмориллонита рекомендуется (в зависимости от конкретности поставленной задачи) проводить одним из следующих методов.

Метод рентгенографического анализа применим при приближенно-количественной оценке содержания монтмориллонита в глинах. Он также позволяет оценивать изменение структуры модифицированных монтмориллонитов по значениям базального рефлекса 001, регистрируемого от воздушно-сухих ориентированных препаратов.

Метод ядерного магнитного резонанса (ЯМР) позволяет оценить содержание монтмориллонитового компонента в породе от 30 % и выше (порог обнаружения составляет 5 %). Сигнал ЯМР от ядер водорода в составе исследуемой пробы представляет собою сигнал свободной индукции (ССИ), его интенсивность служит мерой содержания ММ, а форма и длительность отражают структурно-кристаллохимические характеристики ММ.

Методами термического анализа, в соответствии с величиной потери массы слабосвязанной воды, определяют содержание монтмориллонитового компонента, и тип бентонита.

Для определения содержания монтмориллонитового компонента, его типа и некоторых особенностей кристаллической структуры предлагается применять методы адсорбционного люминесцентного анализа (АЛА) и статической влагоемкости (СВ).

Не менее важным критерием оценки качества бентонитсодержащего сырья служит тип бентонита: щелочной или щелочноземельный, который определяется по соотношению катионов:  $(\text{Na}^+ + \text{K}^+) / (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ . Для щелочного типа бентонитов это соотношение составляет более 1,0, для щелочноземельных менее 0,5, для смешанного типа имеет промежуточное значение – от 0,5 до 1,0.



Для диагностики типа бентонита применимы методы статистической влагоемкости, термогравиметрического анализа, протонного магнитного резонанса и рентгенофазового анализа.

Тип бентонита устанавливается также по степени набухания глин в солевом растворе с применением метода определения коллоидальности, который основан на определении седиментационного объема, образующегося в глинистой суспензии.

Широкие вариации изоморфных замещений, отклонения от стехиометрии содержания ОН-групп положены в основу выделения трех кристаллохимических разновидностей монтмориллонита. Эти различия диагностируются по кристаллохимическим формулам элементарной ячейки, рассчитанным по данным химического анализа для мономинеральных фракций, выделенных из проб бентонитов.

Кроме того, принадлежность монтмориллонита к одной из кристаллохимических разновидностей устанавливается термоаналитическими методами с помощью специальных методических приемов по прямой зависимости интервала температур дегидроксилизации монтмориллонита от степени совершенства его структуры.

1<sup>я</sup> разновидность. Заряд образуется по двум механизмам: за счет изоморфизма  $Al^{3+}$  на  $Mg^{2+}$  и  $Fe^{2+}$  (заряд  $x$  и  $y$ ) и при частичной депротонизации ОН-групп ( $-m$ ). В обменном комплексе глин преобладают одновалентные щелочные катионы  $Na^+$  и  $K^+$ . Типичны микрочастицы из единичных силикатных слоев. Для данной разновидности

характерна высокотемпературная дегидроксилизация ( $580-750\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

2<sup>я</sup> разновидность. Величина отрицательного заряда определяется действием трех механизмов: замещением  $Al^{3+}$  на  $Mg^{2+}$  и  $Fe^{2+}$  в октаэдрах,  $Si^{4+}$  на  $Al^{3+}$  в тетраэдрах и его частичной компенсации за счет протонизации (сверх стехиометрии) с образованием дополнительных ОН-групп ( $+m$ ). Общий заряд равен  $[x+y+n-(+m)]$ . Это – бентониты со смешанным составом обменных катионов, с повышенной долей ионов  $K^+$ , но с превышением заряда  $Ca^{2+}+Mg^{2+}$  над  $K^++Na^+$ . Микрочастицы – трех- и двухслойные тактоиды.

3<sup>я</sup> разновидность. Отрицательный ( $-$ ) заряд ( $x$ ) возникает преимущественно за счет изоморфных замещений  $Al^{3+}$  на  $Mg^{2+}$  в октаэдрических позициях. Катионы-компенсаторы  $[(+)$  заряд] – в основном щелочноземельные обменные катионы  $Ca^{2+}$  и  $Mg^{2+}$ . Микрочастицы представлены многослойными (четыре или более силикатных слоя по оси  $C$ ) кристаллами. По данным ДТА для данной разновидности зафиксирован одноэтапный процесс удаления ОН-групп в низкотемпературной области ( $400-650\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Установлено также, что первая кристаллохимическая разновидность типична для гидротермально-метасоматического типа, третья – для бентонитов осадочного генетического типа. Бентониты вулканогенно-осадочного и элювиального типа занимают промежуточное положение и могут присутствовать во всех разновидностях (рис. 1).

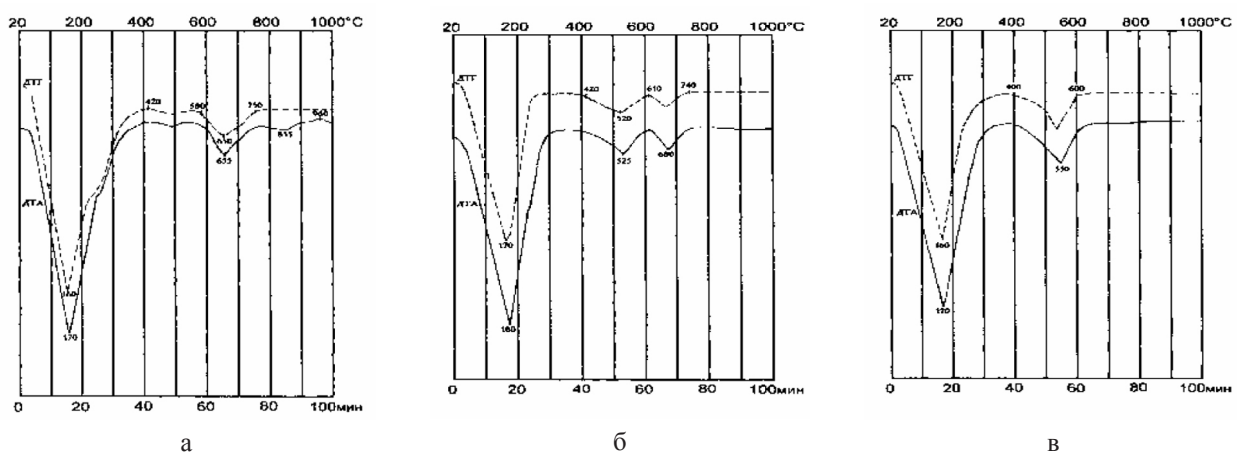


Рис. 1. Результаты ДТА: а) 1<sup>я</sup> разновидность, б) 2<sup>я</sup> разновидность, в) 3<sup>я</sup> разновидность

Предложена корреляция выделенных кристаллохимических разновидностей бентонитов с их оптимальными технологическими свойствами и применением.

В качестве связующего, пластифицирующего компонента с высокой степенью набухаемости могут быть использованы бентониты с содержанием монтмориллонита первой и

второй разновидности щелочного и щелочно-щелочноземельного типа. В качестве сорбентов с максимальной величиной активности и содержанием активных центров могут быть использованы бентониты, имеющие в своем составе монтмориллониты второй и третьей разновидности щелочноземельного и щелочно-щелочноземельного типа. Так, бентониты, содержащие вторую разновидность монтмориллонита с апротинизацией, оказываются наиболее устойчивыми к влиянию солей двухвалентных катионов в буровых растворах. Бентониты с монтмориллонитом третьей разновидности являются лучшими адсорбентами, как в естественном, так и кислотно-активационном виде. В то же время они трудно поддаются модифицированию при обработке солями натрия, особенно когда в них преобладают многослойные кристаллиты. Это следует учитывать при производстве буровых растворов и других направлений использования, когда требуется получение бентонитов с высокими пластифици-

рующими и связующими свойствами. Бентониты с монтмориллонитом первой и второй разновидностей с высокими значениями pH суспензий могут оказаться менее устойчивыми при кислотной обработке, что следует учитывать при производстве адсорбентов и катализаторов. Вариации кристаллохимических разновидностей в бентонитах влияют на состав новообразованных высокотемпературных фаз и тем самым на свойства получаемой керамики.

Таким образом, предлагаемые методические аспекты прогнозной оценки качества бентонитовых глин, согласно критериям специфических физико-химических и структурно-кристаллохимических свойств основного породообразующего компонента – монтмориллонита, позволяют осуществить минералогическую классификацию глинистого сырья и дать рекомендации по его оптимальному использованию в конкретных направлениях и эффективных способах переработки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. с. 1127892 СССР, МКИ, 3С 09 К7/02. Глино-порошок для буровых растворов / З. А. Литяева и др.
2. Патент 2148068 РФ МПК 7С 09К7/02 Способ получения глинопорошка для буровых растворов / Б. А. Растегаев, А. И. Пеньков, Л. П. Вахрушев и др. Заявл. 05. 03. 98; опубл. 27. 04. 00. БИ № 14, 2000
3. М. В. Эйриш Кристаллохимические и структурные особенности монтмориллонита и их диагностика в бентонитах // Спектроскопия, рентгенография и кристаллохимия минералов: сборник статей / Власов В. В., Гревцев В. А. и др., Казань. Издательство Казанского университета, 1997. С. 154–160.
4. Шляпкина Е. Н., Эйриш М. В., Губайдуллина А. М. Термоаналитическая диагностика кристаллохимических разновидностей монтмориллонита. // «Разведка и охрана недр». 2000. № 9. С. 17–20.
5. Ф. А. Трофимова Влияние механоактивационных процессов на изменение коллоидных и реологических свойств бентонитовых глин // Сборник научных статей по материалам Российского семинара по технологической минералогии / Трофимова Ф. А., Лыгина Т. З., Сабитов А. А. и др. Петрозаводск, 2006. С. 99–110.

УДК 549. 623. 7: 622. 7. 017. 2

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МИНЕРАЛОГИИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ СЕРПЕНТИНИТОВ УЧАСТКА ПЕНТИНСУО

*Ильина В. П., Фролов П. В., Кевлич В. И., Климовская Е. Е., Попова Т. В.,  
Инина И. С., Мاستрюкова С. Р., Кервенен А. В.*

*ИГ КарНЦ РАН, г. Петрозаводск*

В настоящее время существуют разработки по практическому применению высокомагнетизальных пород – серпентинитов [1–3]. Одним из направлений использования серпентинитов является получение на их основе антифрикционных твердосмазочных покрытий, применяемых в машиностроении. Наличие такого покры-

тия на трущихся металлических поверхностях позволяет существенно увеличить срок службы обрабатываемых механизмов. Для повышения износостойкости узлов трения известные твердосмазочные композиции: содержащие, например: лизардит, кварц, гетит, брусит [4], серпентин (лизардит и хризотил), содер-

жащий в изоморфной примеси железо, алюминий [5], серпентин, авгит, гиперстен, эгирин, диопсид и жадеит [6], серпентин (лизардит), с вкрапленным магнетитом [7]. Актуальным является применение различных модификаций серпентина для антифрикционных покрытий металлов. В природных серпентинитах обычно присутствуют разные модификации серпентина: хризотил, имеющий волокнистую структуру, антигорит и лизардит с пластинчатой структурой. Пластинчатые серпентины, в особенности антигорит, – наиболее стабильная и устойчивая к механическому воздействию и высоким температурам модификация, более благоприятная для формирования покрытия [8]. Серпентины относятся к группе триоктаэдрических слоистых силикатов. Высокая твердость слоистых силикатов по  $\alpha$ -плоскости способствует сопротивлению изнашиванию и высокому пределу текучести защитного покрытия.

В данной работе, с использованием методов технологической минералогии, изучены пробы серпентинитов: участка Пентинсуо месторождения талькового камня Озерки (район г. Костомукша) и Аганозерского месторождения хромитовых руд (Пудожский район) и установлена возможность получения мономинерального серпентина для использования в триботехнике.

Таблица 1. Химический состав исследованных проб серпентинитов, масс. %

№ проб	SiO <sub>2</sub>	TiO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	п. п. п.
323	33,39	0,20	0,22	6,31	3,51	0,133	40,42	0,01	0,02	0,01	(1,8)	0,054	15,69
ПС-12	39,10	0,17	2,22	3,46	4,02	0,07	37,10	0,22	0,03	0,01	0,35	0,194	12,68

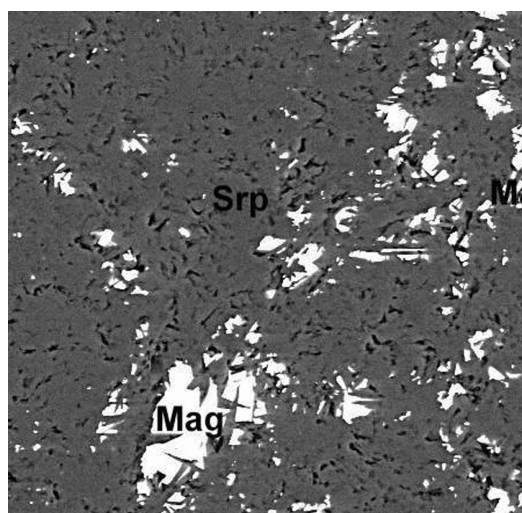


Рис. 1. Электронное изображение микроструктуры серпентинита пробы ПС-12: Mag-магнетит, Srp-серпентин

Лабораторно-технологическая проба серпентинитов Аганозерского объекта, образовавшихся по массивным перидотитам верхнего горизонта, была отобрана в пределах северной части месторождения из керна скважины № 323. Серпентиниты участка Пентинсуо, образованные по коматиитовым кумулатам, изучены на штучной пробе ПС-12, отобранной в коренном обнажении.

По данным химического анализа (табл. 1), пробы серпентинита обоих месторождений богаты магнием (37–40 %). Проба 323 содержит незначительное количество примесей Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0,2 %) и CaO (0,001 %). В пробе ПС-12, наряду с высоким содержанием MgO, в качестве примесей присутствуют Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 2,2 %, CaO – 0,22 %, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 3,46 %, FeO – 4,02 %. По результатам рентгенофазового анализа (РФА) проба 323 состоит на 85 % из серпентина, являющегося главным породообразующим минералом, также в ней присутствуют магнетит и гидроталькит. Минеральный состав серпентинитов участка Пентинсуо определен методом количественного минералогического анализа. Проба содержит (в масс. %): серпентин – 79,37, магнезит – 5,2, тонкозернистые агрегаты (серпентин, магнезит, магнетит) – 12,06, магнетит – 1,72, ильменит – 0,47, пентландит + миллерит – 0,48, хромит – 0,01, гидрокислы железа – 0,69.

Минералого-аналитические исследования серпентинитов участка Пентинсуо, показали, что серпентиниты сложены тонкозернистым агрегатом пластинчатого антигорита и рудных минералов. Серпентин в шлифах бесцветный, размер выделений до 50 мкм. Структура пород реликтовая мезокумулятивная, контур псевдоморфоз по первичным силикатам подчеркивается цепочками рудных минералов. Электронное изображение микроструктуры серпентинита пробы ПС-12 приведено на рис. 1. В целом рудные минералы распределены в породе неравномерно и представлены пылевидной вкрапленностью и цепочками зерен (магнетит, ильменит, сульфиды) размером до 0,05 мм; прожилками, с которыми ассоциируют ксеноморфные зерна размером до



0,2 мм; а также идиоморфными кристаллами хромшпинелидов размером до 0,4 мм. Тальк образует тонкочешуйчатые массы, преимущественно приуроченные к центральным частям псевдоморфоз. Размер чешуек до 0,4 мм. Отмечается развитие в породе карбонатных прожилков, а также антигорита поздней генерации, характеризующегося игольчатой формой выделения, секущего все породообразующие минералы. Методом микрозондового анализа, выполненного на энергодисперсионном анализаторе INCA Energy 350 (на базе сканирующего электронного микроскопа Vega II LSH), установлен химический состав мономинерального серпентина (масс. %):  $MgO$  – 36,06;  $Al_2O_3$  – 2,53;  $SiO_2$  – 41,66;  $FeO$  – 4,75.

Электронное изображение микроструктуры серпентинита пробы 323 приведено на рис. 2. Для серпентинитов Аганозера характерны разнообразные структуры: решетчатая, петельчатая, листовая, пламенивидная, волокнистая и структуры песочных часов. Наряду с преобладающими включениями хромита размерами от тысячных долей до десятка миллиметров (минеральные агрегаты), в них присутствуют макро- и микроскопически тонкораспыленные включения магнетита, хромита, а по ослабленным зонам, границам срастания в серпентин не встречаются карбонаты, реликты оливина, сульфиды никеля. Магнетит в пробе 323 находится в виде обломков, уплощенных зерен, микровключений с размерами от 0,05 до 0,5–0,16 мм и менее.

Минеральные агрегаты хромита в пробе 323 имеют размеры от 0,05 до 1,5–0,2 мм и менее. Распределенные по зерну, они меняют окраску серпентина от бурой и темно-зеленой до черной, с эффектом частичного просвечивания в проходящем свете микроскопа.

Согласно данным дифференциально-термического анализа (ДТА), серпентин Аганозерского месторождения преимущественно представлен лизардитом (в малом количестве присутствует хризотил), характеризующимся сильными эндоэффектом при 610 °С и экзоэффектом при 810 °С. Серпентин участка Пентинсуо, по данным ДТА, относится к антигориту, характеризующемуся сильными эндоэффектом при 730 °С и экзоэффектом при 824 °С.

Полученные данные о минеральном и химическом составе, морфоструктурных характеристиках и технологических свойствах позволяют

проводить прогнозную технологическую оценку серпентинитов на обогатимость.

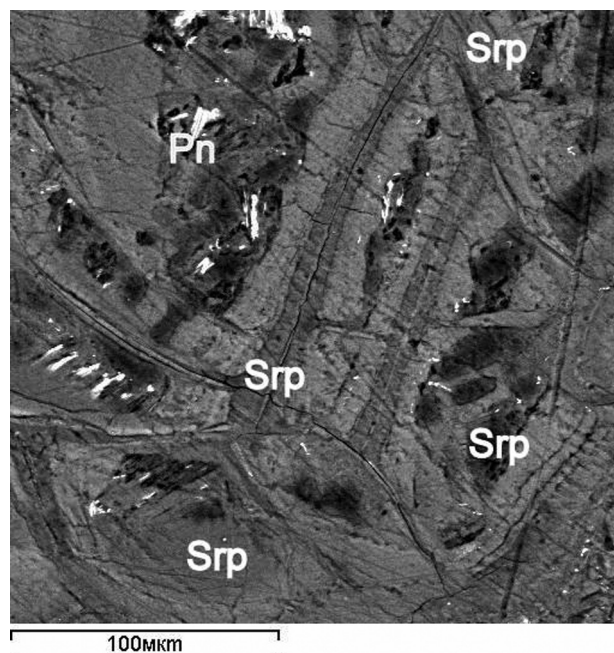


Рис. 2. Электронное изображение микроструктуры серпентинита пробы 323: Srp-серпентин, Pn-пентландит

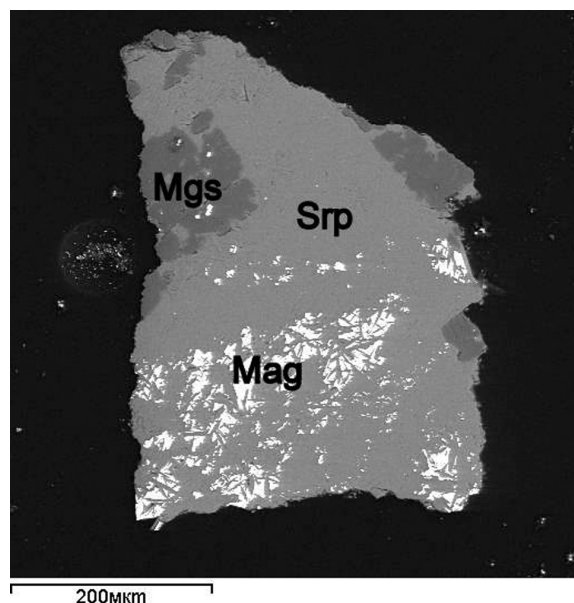
По разработанной схеме обогащения извлечение серпентина (лизардита) составляет 86,7 % (проба 323).

На первом этапе изучения пробы ПС-12 Пентинсуо, в качестве объекта для обогащения, выбор крупности измельчения обусловлен текстурно-структурными особенностями и свойствами твердости породы и серпентина. После измельчения до крупности – 0,16 мм серпентин в пробе ПС-12 находится в основном в виде свободных зерен, которые представлены осколками, обломками, округлыми зернами и вместе с тем микроскопически в них наблюдаются тонкодисперсные включения рудных минералов (хромит, магнетит), гнезда и цепочки включений магнетита. Основную часть магнетита составляют зерна размером менее 50 мкм. Реже встречаются зерна размером от 50×50 мкм до 400×250 мкм. Размер зерен хромита от 50 до 400 мкм, преобладают зерна размером 50×50 мкм. Распределенные по зерну серпентина, они меняют окраску минерала от бурой, темно-зеленой до черной, с эффектом частичного просвечивания в проходящем свете микроскопа.

Степень раскрытия минералов при измельчении пробы ПС-12 приведена в таблице 2. При этом хаотичность распределения рудных включений по фракциям в серпентине является факто-



ром непредсказуемости их раскрытия и при весьма тонком измельчении. Включения магнетита в серпентините Пентинсуо показаны на рис. 3. Для обогащения серпентинитов пробы ПС-12 выбор крупности дробления и измельчения осуществлялся с учетом выявленных особенностей и состоял в дроблении до 2 мм и измельчении до 0,16 мм, что способствовало оптимальному раскрытию серпентина. Схема получения мономинерального серпентина из пробы серпентинитов участка Пентинсуо представлена на рис. 4.



В немагнитной фракции получен мономинеральный серпентин, содержащий микровключения магнетита и других минералов, нераскрываемых при выбранной крупности измельчения. Количество таких включений составляет, по данным микроскопических определений, 93,5 % от всех зерен серпентина при крупности измельчения до 0,5 мм. По результатам обработки по схеме в концентрате серпентина содержание оксидов железа удалось снизить до 4–5 масс. %.

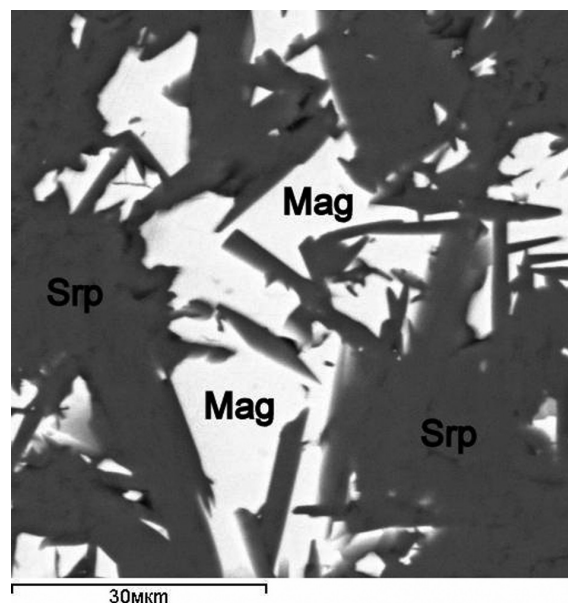


Рис. 3. Включения магнетита в серпентините Пентинсуо: Mag-магнетит, Mgs-магнезит, Srp-серпентин

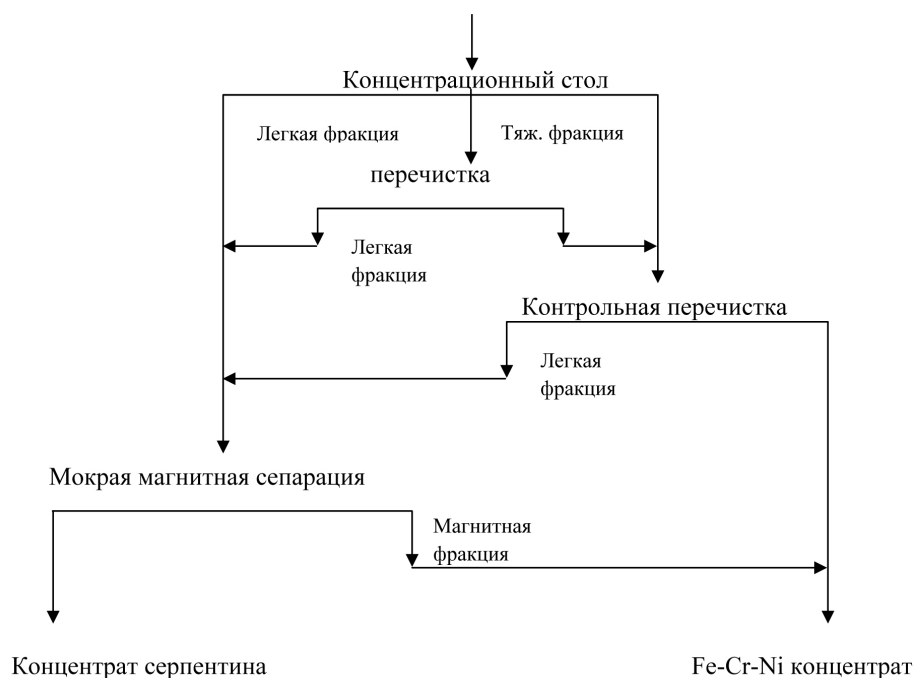


Рис. 4. Схема получения мономинерального серпентина из пробы серпентинитов участка Пентинсуо

Таблица 2. Характер раскрытия серпентинов участка Пентинсуо при измельчении до крупности 0,16 мм

Характер сра- станий	Классы крупности					Примечания
	+0,2	+0,16	+0,1	0,071	+0,05	
Свободный серпентин (вес. %)	73,28	88,57	88,02	88,35	88,1	Включения магне- тита в серпентине. Размер включений от 0,05 мм до 0,025 мм и менее
Сростки серпентина (вес. %)	1,31	3,3	–	2,57	–	Серпентин со сростками магне- зита (размер до 0,01 мм), магнетита (размер до 0,01 мм)
Свободные породообра- зующие мине- ралы (вес. %)	Тонкозернистые агрегаты – 18,98 Магнетит – 3,28 Магнетит – 3,15 Пирит – ед. знаки (25,41)	Тонкозернистые агрегаты – 3,3 Магнетит – 2,93 Магнетит – 1,9 (8,13)	Тонкозернистые агрега- ты – 1,94 Магнетит – 3,61 Магнетит – 1,86 Пирит – 3,12 Тальк – 1,45 (11,98)	Магнетит – 2,87 Магнетит – 4,35 Пирит – 1,86 Ильменит – ед. знаки (9,08)	Магнетит – 8,1 Магнетит – 3,8 (11,9)	Магнетит – 8,79 Магнетит – 4,51 (13,3)
ИТОГО:	100	100	100	100	100	100

Причиной отклонения физических свойств серпентина являются генетические особенности серпентина, а именно – метаморфическое преобразование ультрамафитов (перидотитовых и пироксенитовых коматиитов, а также интрузий ультраосновного состава), сопровождаемое образованием в виде весьма тонкодисперсных (точечных) включений неизвлекаемого магнетита в серпентине. Распределение включений рудных минералов в серпентине является фактором непредсказуемости их раскрытия даже при более тонком измельчении серпентинитов до 0,05мм.

Следует отметить, что кроме получения монофракции антигорита для триботехники, перспективным при обработке по такой технологической схеме является получение тяжелого продукта, содержащего магнетит, хромит, пентландит, миллерит, что требует дальнейшего изучения.

На рисунках 5, 7 представлены электронные изображения полученных монофракций: серпентина

Пентинсуо (рис. 5) и Аганозера (рис. 7), на лазерном микроскопе Color 3D VK-9710K. На рисунках 6, 8 приведены спектры комбинационного рассеяния полученной монофракции пробы ПС-12 (рис. 6) и пробы 323 (рис. 8).

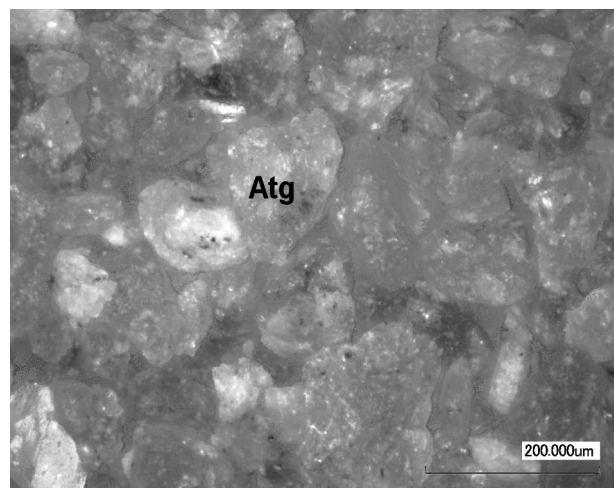


Рис. 5. Зерна серпентина Пентинсуо Atg- антигорит

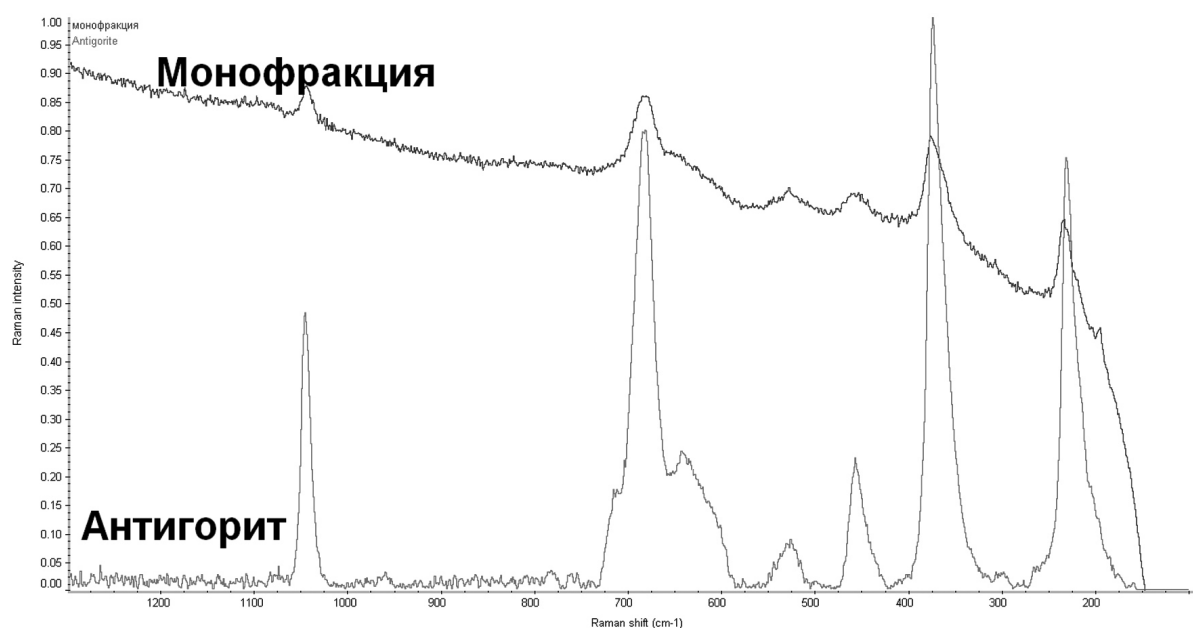


Рис. 6. Спектры комбинационного рассеяния

По спектру комбинационного рассеяния в монофракции серпентина Пентинсуо диагностируется антигорит, а в монофракции серпентина Аганозера – lizardite.

Полученная монофракция серпентина (антигорита) будет использована в составах триботехнических смесей.

Предварительные испытания триботехнических смесей на основе серпентина Аганозера, проведенные на базе ООО «НИЛ «Триботех»

(Санкт-Петербург), показали, что добавка в масло нескольких грамм порошка, измельченного до 40 мкм, в несколько раз снижает коэффициент трения на поверхностях соприкосновения. Кроме того, в местах повышенного износа создается устойчивая керамическая корка, впитывающая и удерживающая масло. По результатам исследований, приведенных в патенте [7], показано, что добавка мономинерального серпенти-

на (антигорита) может значительно повысить качество триботехнических смесей. Кроме того достаточно крупные зерна магнетита и хромшпинелидов отрицательно влияют на износ деталей в силу своей высокой твердости и абразивности, в то же время микрокристаллические вроски магнетита в чешуйки серпентина усиливают его способность к аутогезии магнитного происхождения [8]. В патенте [5] указано, что тонкодисперсный (0,01–5 мкм) порошок, содержащий 88 % лизардита и хризотила, 8,6 % магнетита, попадая в зону трения, структурно модифицирует поверхность и создает защитный квазисжиженный слой. Использование такого порошка в двигателях, механизмах позволит снизить износ узлов трения в 2–3 раза, потери на трение в 2–3 раза и виброактивность на 50–100 %. Применение триботехнических смесей позволяет существенно увеличить срок службы обрабатываемых механизмов. Происходит частичное восстановление изношенных поверхностей трущихся дета-

лей («безразборный» ремонт), кроме того, механизмы относительно длительное время смогут работать в условиях «масляного голодания» в аварийных ситуациях (например, двигатель внутреннего сгорания при утечке масла).

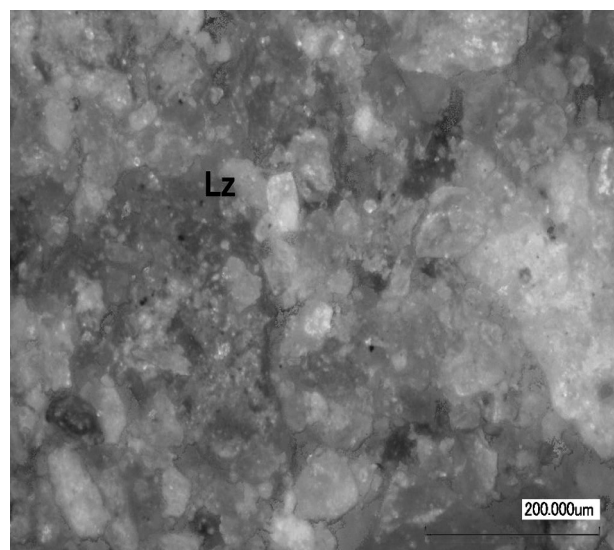


Рис. 7. Зерна серпентина Аганозеро: Lz – лизардит

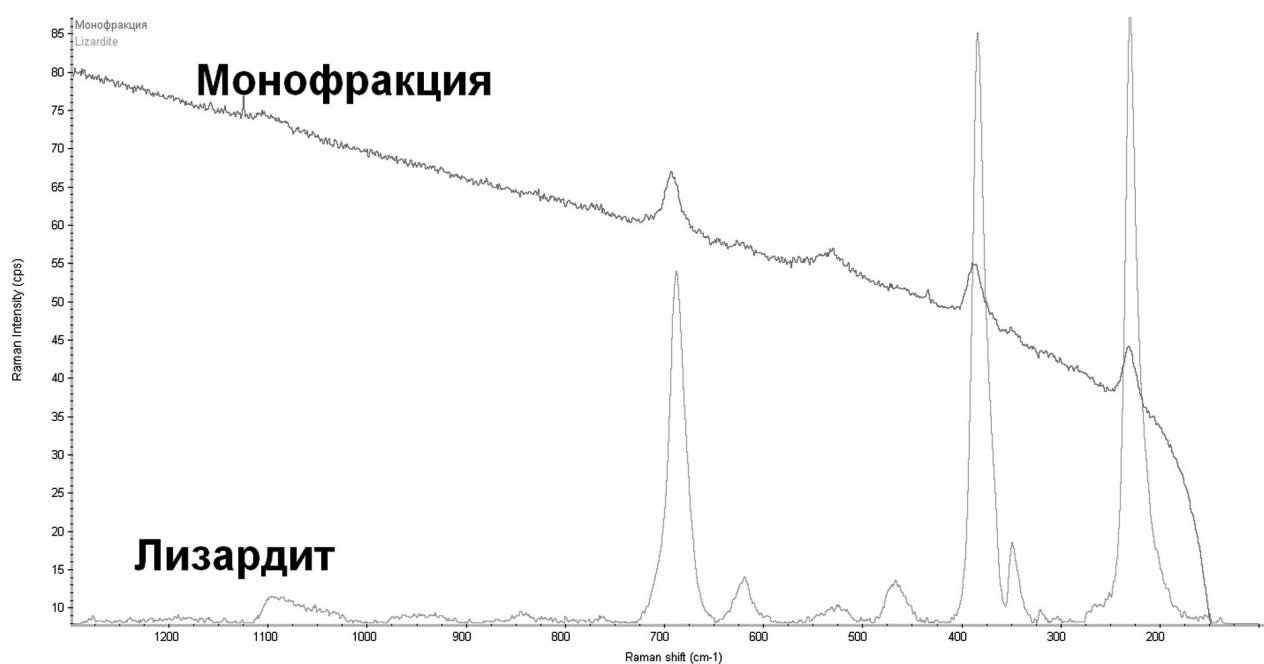


Рис. 8. Спектры комбинационного рассеяния

### Выводы:

Испытания двух проб по выбранной технологии обогащения позволили получить концентрат серпентина (антигорит) для использования в триботехнике и тяжелый продукт с выходом 12 %, состоящий из миллерита, пентландита,

магнетита, хромита и др. Доводка рудного концентрата стола в тяжелых средах увеличивает концентрации рудных минералов и, соответственно, уменьшает выход до 0,6 %. Данные выводы носят предварительный характер, так как не раскрывают общей картины.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Серпентинит в защите атомных реакторов. / Под ред Ю. А. Егоровой М., 1973. 243 с.
2. Ведерников М. И., Гонюх В. М., Корнилов А. В. и др. Комплексная переработка серпентинитов с получением высокочистого оксида магния, высокодисперсного оксида кремния, концентратов металлов, азотно-магниевых удобрений, вяжущих, наполнителей полимерных материалов и адсорбентов. // Тезисы докл. Международного симпозиума, С-Петербург, 1996, с. 78.
3. Масленников Г. Н., Харитонов Ф. Я., Костюков Н. С., Пирогов К. С. Технология электрокерамики. «Энергия», М, 1974. 224 с.
4. Пат. № 2247767 РФ, МПК C10M125/00. Твердосмазочная композиция и способ формирования покрытия на трущихся поверхностях с ее использованием / Павлов К. А., Волков В. Г., Волков С. В.; патентообладатель – Павлов К. А. Заявка № 2002131140/04; заявл. 20. 11. 2002; опубл. 10. 03. 2005.
5. Пат. № 2169172 РФ, МПК C10M125/04. Состав для безразборного улучшения триботехнических характеристик узлов трения «Геомодификатор трения». / Аратский П. Б., Лавров Ю. Г.; патентообладатель Аратский П. Б. – Заявка № 99127237/04; заявл. 28. 12. 1999; опубл. 20. 06. 2001.
6. Пат. № 2302453 РФ, МПК C10M161/00. Смазочный состав для обработки пар трения / Мельников В. Г., Зарубин В. П.; патентообладатель – Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Ивановский государственный химико-технологический университет» (ИГХТУ). Заявка № 2006108717/04; заявл. 20. 03. 2006; опубл. 10. 07. 2007.
7. Пат. № 2415176, РФ, МПК C10M103/06. Нанотехнологическая антифрикционная порошковая композиция. / Давыдов Н. А., Зуев В. В., Рейбанд Ю. Я. ООО «НЭСК»; патентообладатель – ООО «НЭСК». Заявка № 2009121480/04; заявл. 29. 05. 2009; опубл. 10. 07. 2010.
8. Ващенко А. В., Казарезов В. В., Таловина И. В., Костенко В. В. Серпентиниты в триботехнике // Аналитические идеи, методы, технологии. Вып. 1. СПб., 2002. С. 43–50.
9. Фролов П. В., Кевлич В. И., Ильина В. П., Попова Т. В., Сибелев О. С., Савицкий А. И., Орлов И. В. Минералого-технологические исследования высокомагнезиального сырья Аганозерского комплексного объекта. / Геология и полезные ископаемые Карелии. № 16. Петрозаводск, 2013. С. 102–108.

## ВОЗМОЖНОСТИ ОБОГАЩЕНИЯ ПОЛЕВОШПАТОВОГО СЫРЬЯ КАРЕЛИИ МЕТОДОМ ОПТИЧЕСКОЙ СЕПАРАЦИИ

*Горбунова Е. В.<sup>1</sup>, Чертов А. Н.<sup>1</sup>, Щипцов В. В.<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup> Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, <sup>2</sup> ИГ КарНЦ РАН, г. Петрозаводск*

Извлечение минералов из слюдосодержащих пегматитов для использования в качестве сырья многоцелевого назначения возможно при внедрении комплексной технологии, обеспечивающей при минимальных потерях получение полевых шпатов (микроклина, плагиоклаза), кварца и мусковита) заданного качества в соответствии с требованиями потребителей [3].

Новые возможности открывает интенсивное развитие радиометрических методов сепарации и сортировки, основанных на различных физических явлениях, протекающих при взаимодействии минералов и слагающих их химических элементов с различными видами излучений. В последние годы в горнодобывающей промышленности для сортировки минералов стали активно использовать «фотометрические» (оптические) сепараторы, принцип работы которых основан на определении цветовых различий между минеральными компонентами [1] с последующим выделением

полезной фракции из исходной руды посредством системы пневмоклапанов.

Однако перспективный, в целом, оптический метод нередко пасует перед материалом, отличающимся слабой цветовой контрастностью входящих в него компонентов. В то же время в оптических сепараторах используются технологии технического зрения, чьи возможности много шире, чем получение и анализ только цветовой информации об объектах наблюдения.

Указанные обстоятельства обуславливают актуальность исследований, направленных на развитие основ оптического метода и обеспечение возможностей обогащения сложных, в том числе забалансовых, руд твердых полезных ископаемых, каковым нередко является и полевошпатовое сырье.

Авторским коллективом проведены исследования минералов из пегматитов рудников «Плотина» и «Хетоламино»: мусковита, биотита, микроклина, плагиоклаза и кварца.

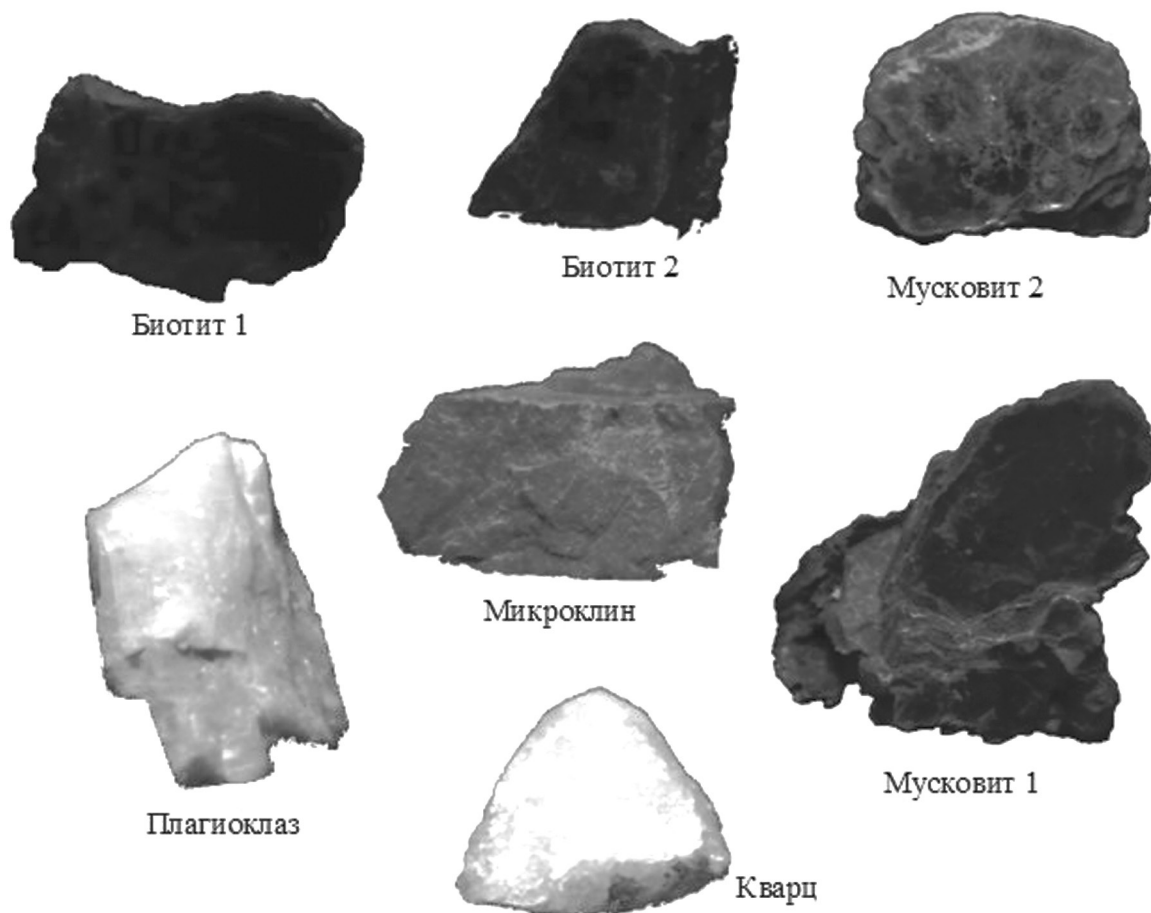


Рис. 1. Изображения типичных образцов минералов, полученные при одинаковых условиях освещения

Проведенное визуальное изучение позволило выявить признаки, существенные для разделения указанных минеральных образцов оптическим методом.

**Кварц.** Поверхность образцов кварца обладает равномерно-ярким бликом при любой ориентации образцов относительно системы освещения. При этом образцы кварца отличаются крупнозернистой трещиноватой структурой.

**Плагиноклаз.** Отличается наличием жирного блика на всей видимой поверхности при определенной ориентации образца относительно системы освещения. В отсутствие блика образцы плагиноклаза менее яркие по сравнению с образцами кварца. Также они менее прозрачны. Образцы плагиноклаза характеризуются ярко выраженными параллельно расположенными трещинами двух направлений.

**Микроклин.** Отличается наличием на поверхности светлых слабо- и средне насыщенных областей красных и красно-фиолетовых оттенков, которые не наблюдаются у образцов других ми-

нералов. Независимо от ориентации относительно системы освещения, микроклин всегда отличается наличием светлой матовой поверхности.

Образцы биотита и мусковита, подобно образцам плагиноклаза, при определенной ориентации относительно системы освещения могут бликовать. В том случае, когда образцы мусковита и биотита не бликуют, они существенно темнее образцов микроклина, кварца и плагиноклаза.

**Мусковит.** При отсутствии блика образцы мусковита отличаются наличием темных средне насыщенных оранжевых и желтых оттенков.

**Биотит.** При отсутствии блика поверхность биотита является очень темной, и для оптико-электронной системы будет казаться фактически чёрной.

Далее исследования проводились на стенде для цветового анализа статических объектов кафедры оптико-электронных приборов и систем Университета ИТМО (г. Санкт-Петербург) [2]. Целью исследований было установление объективных (измеряемых) отличий оптических ха-

рактических образцов кварца, плагиоклаза, микроклина, биотита, и мусковита, которые могут быть использованы для выделения образцов из исходной руды (смеси).

На рис. 2 и 3 представлены обобщенные результаты анализа цветовых параметров образцов вышеуказанных минералов методом техниче-

ского зрения. Анализ осуществлялся в цветовой модели HLS (H – цветовой тон, L – светлота, S – насыщенность), наиболее подходящей для анализа цвета объектов [4], сложных по структуре и цвету поверхности, каковы и являются минералы. На рис. 2 представлены графики цветового тона H, а на рис. 3 – графики светлоты L.

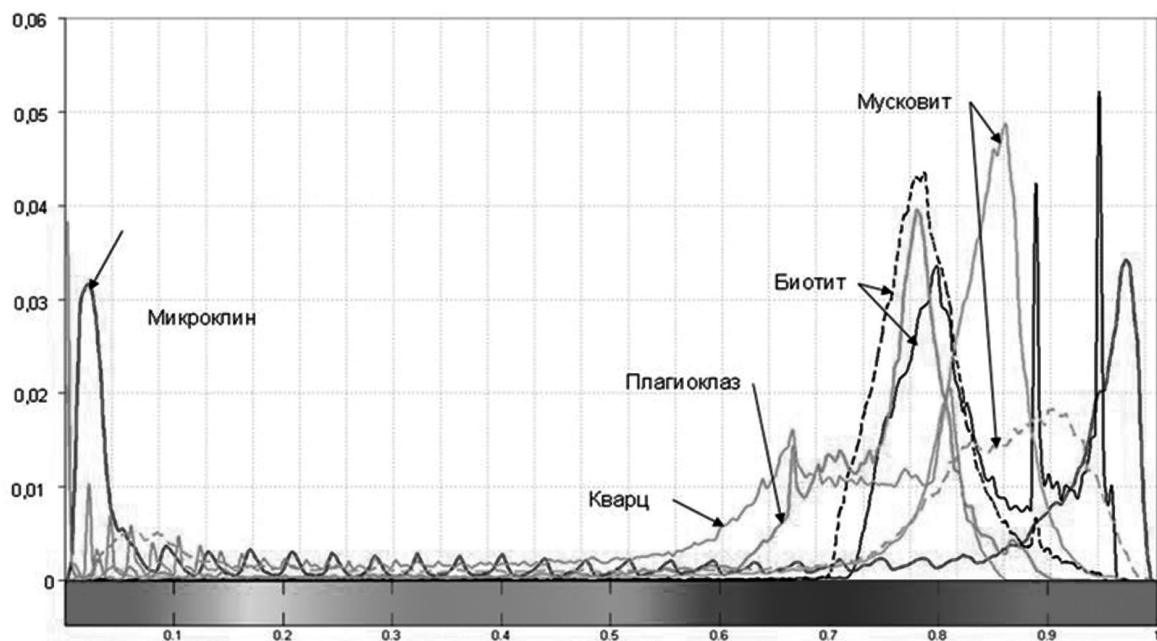


Рис. 2. Графики цветового тона H образцов полевошпатового сырья (шкала канала H построена слева направо – от красного к фиолетовому)

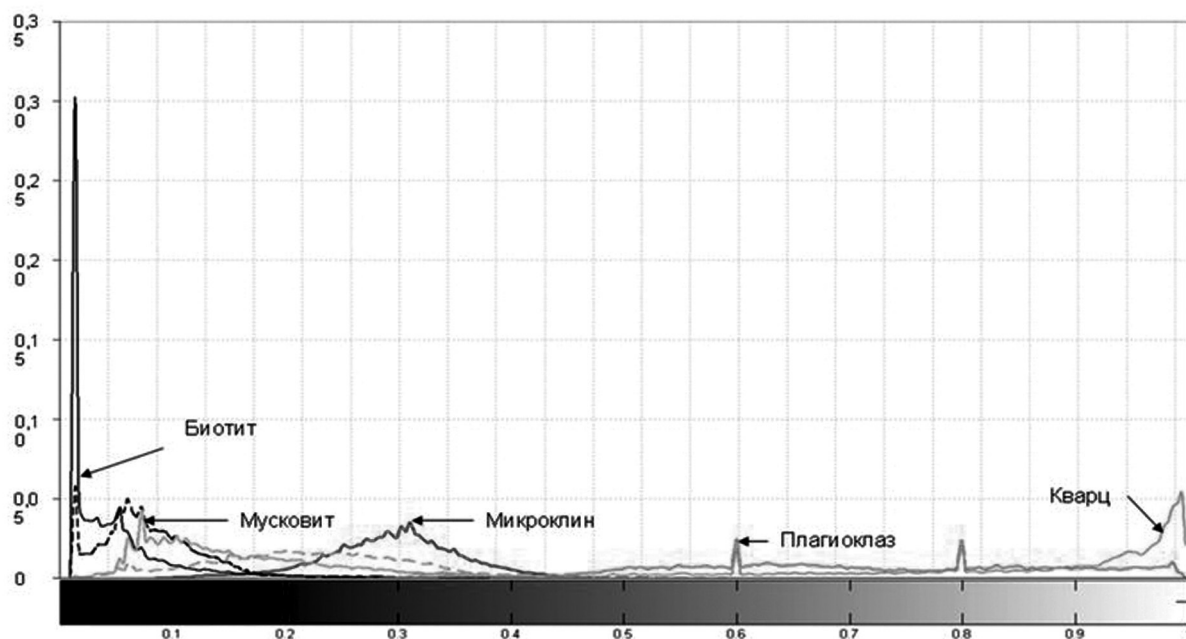


Рис. 3. Графики светлоты L образцов полевошпатового сырья (шкала канала L построена слева направо – от темных оттенков к светлым)

Видно, что по значению канала Н легко отделить микроклин от всех остальных образцов, а канал L является характеристичным для смеси «плагиоклаз + кварц».

Для разделения смеси мусковита и биотита возможно использовать совокупность значений каналов Н и S (см. рис. 4 и 5).

Из рис. 4–5 видно, что мусковит на графике цветового тона Н имеет пики в области красных цветов, а биотит – в области фиолетовых. При этом на графике насыщенности S мусковит располагается в области слабо насыщенных цветов, а биотит имеет аналогичную характеристику на уровне 60–70 %.

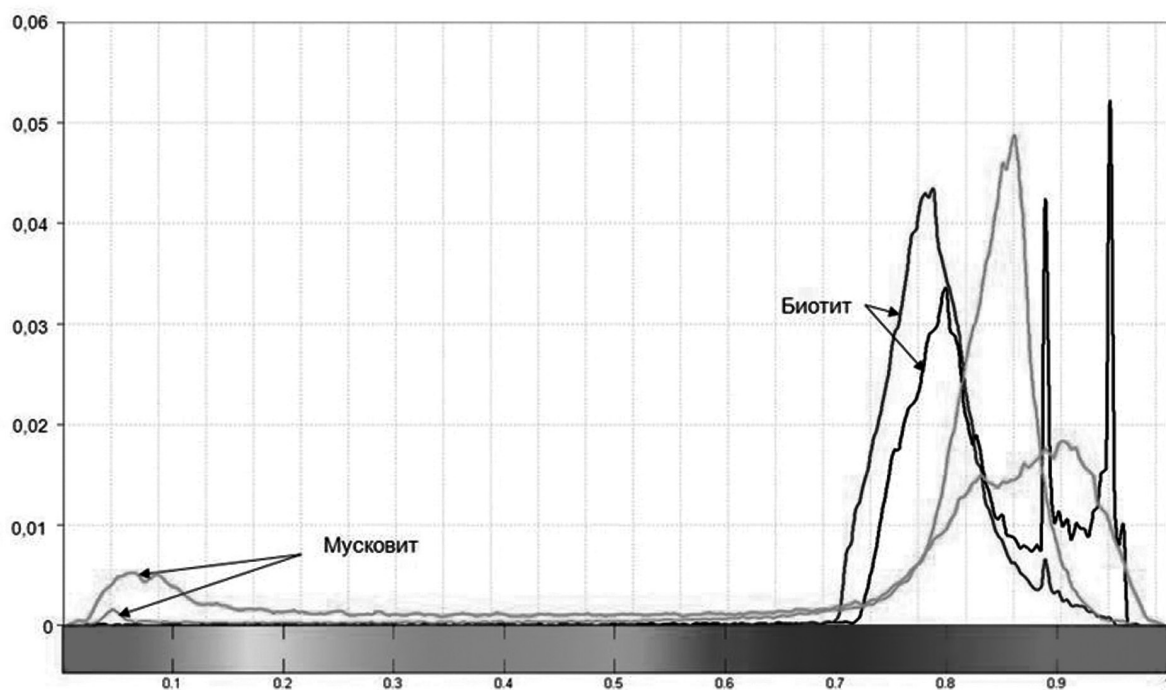


Рис. 4. Графики цветового тона Н для образцов мусковита и биотита

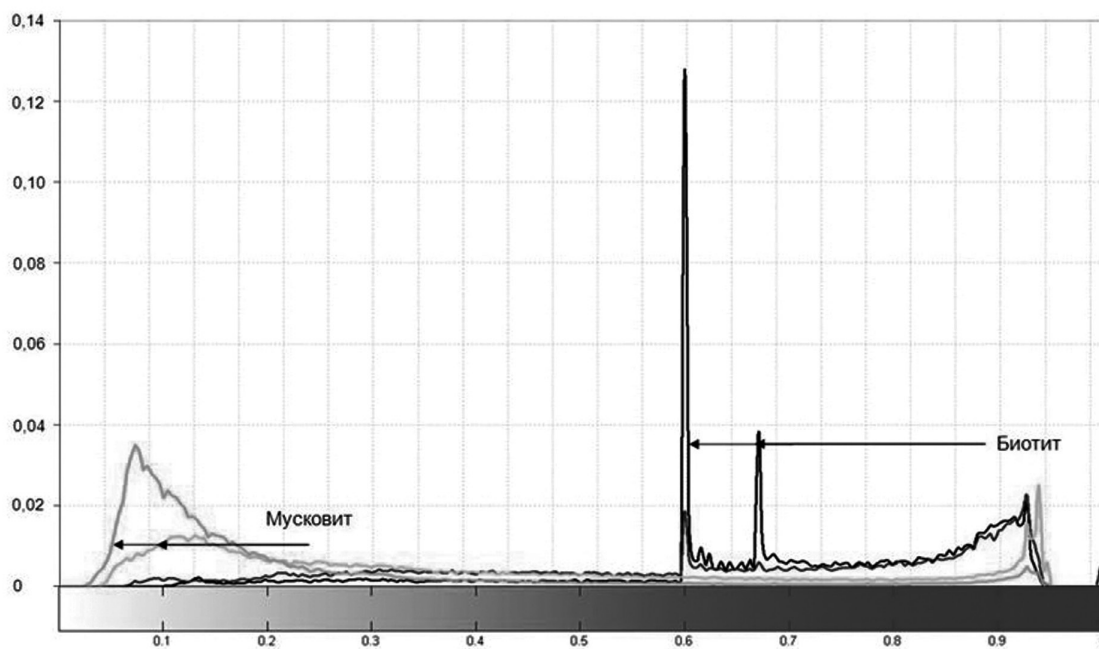


Рис. 5. Графики насыщенности S для образцов мусковита и биотита (шкала канала S построена слева направо – от слабо насыщенных цветов к насыщенным)



Таким образом, результаты проведенных исследований показали, что в общем потоке образцов кварца, плагиоклаза, мусковита, биотита и

микроклина разделение данных минералов возможно в несколько этапов. Предлагаемая схема обогащения представлена на рис. 6.



Рис. 6. Рабочая схема разделения компонентов полевошпатового сырья

Выделение микроклина из общей смеси наиболее эффективно будет осуществлять при помощи цветового признака (блик является непостоянным классификационным признаком, зависящим от ориентации объектов относительно систем подсветки и регистрации изображений).

Кварц и плагиоклаз можно выделить из общей смеси с мусковитом и биотитом по признаку средней яркости изображения объекта.

Мусковит от биотита можно отделить друг от друга при помощи цветового признака – изображения биотита фактически не содержат желтых и оранжевых оттенков. Однако для определения эффективности отделения мусковита от биотита необходимо провести дополнительные исследования на движущихся образцах.

Для отделения кварца от плагиоклаза образцы этих минералов анализировались при рассеянном освещении.



Кварц



Плагиоклаз

Рис. 7. Изображения образцов кварца и плагиоклаза «на отражение»

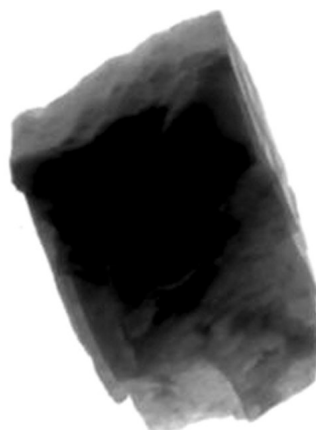
Кварц и плагиоклаз имеют одинаковые цветовые признаки, поэтому их невозможно разделить посредством анализа их цветовых параметров. Однако кварц и плагиоклаз являются полупрозрачными минералами с различной внутренней и поверхностной структурой. Крупные минеральные образцы кварца и плагиоклаза (от 20

до 60 мм) отличаются разной степенью прозрачности: плагиоклаз менее прозрачен, чем кварц (см. рис. 8).

Мелкие минеральные образцы кварца и плагиоклаза (от 5 мм до 20 мм) одинаковы по степени прозрачности и отличаются различной внутренней структурой.



Кварц



Плагиоклаз

Рис. 8. Изображения образцов кварца и плагиоклаза «на просвет»

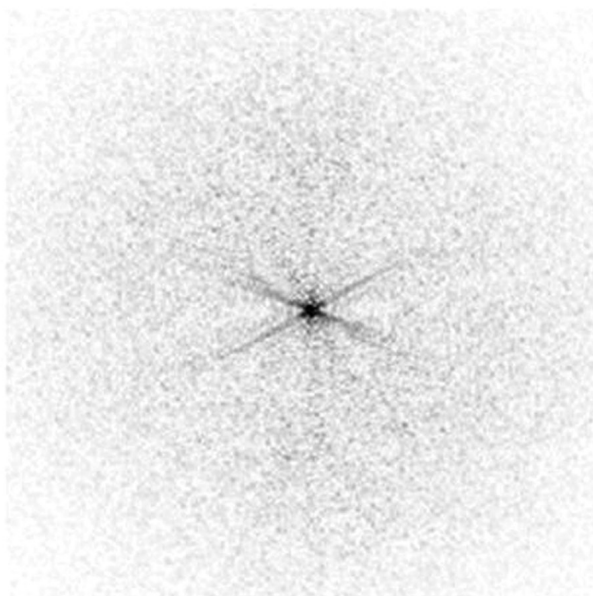


Рис. 9. Двумерные Фурье-спектры изображений кварца и плагиоклаза

Разделение таких образцов возможно при помощи анализа Фурье-спектра изображений. Вследствие крупнозернистой трещиноватой структуры кварца, Фурье-спектр изображений его образцов отличается тем, что почти одинаков во всех направлениях (см. рис. 9). Параллельно расположенные трещины двух направлений плагиоклаза являются причиной того, что Фурье-спектры изображений его образцов отличаются наличием ярко выраженных лучей двух или трех направлений (в зависимости от ориентации образца относительно системы регистрации изображений).

Таким образом, Фурье-спектры изображений минералов могут являться дополнитель-

ными признаками разделения, при этом анализироваться одновременно с цветовой информацией, что, в целом, будет способствовать повышению эффективности обогащения оптическим методом.

Признак «прозрачность» также может являться разделительным, однако данное предположение требует проведения детальных экспериментальных исследований.

Для того чтобы достоверно определить условия сепарации и необходимые пороги разделения, необходимо исследовать сложные образцы, содержащие одновременно кварц и мусковит, кварц и плагиоклаз и т. д.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Горбунова Е. В. Исследование и разработка оптико-электронных систем цветового анализа минерального сырья // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. СПб., 2010. – 157 с.
2. Чертов А. Н., Вакуленко А. Д., Горбунова Е. В. Критерии применимости цветовых пространств в оптико-электронных системах цветового анализа минералов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. Т. 79. № 3. С. 156–157.
3. Щипцов В. В. Способы прогнозирования технологических свойств промышленных минералов (на примере минерально-сырьевой базы Республики Карелия) // Новые методы технологической минералогии при оценке рудных металлов и промышленных минералов. Петрозаводск: изд. КарНЦ РАН, 2009. С. 20–28.
4. Alekhin A. A., Chertov A. N., Gorbunova E. V., Petukhova D. B. Optical-electronic system for express analysis of mineral raw materials dressability by color sorting method // Proc. SPIE. 2013. Vol. 8791, Video-metrics, Range Imaging, and Applications XII; and Automated Visual Inspection, 87911 N. 8 pages.

## ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ АКЦЕССОРНЫХ МИНЕРАЛОВ В ГРАНИТАХ РАПАКИВИ САЛМИНСКОГО МАССИВА (РЕДКОЗЕМЕЛЬНАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ)

*Скамницкая Л. С., Бубнова Т. П.*

*ИГ КарНЦ РАН, г. Петрозаводск*

Промышленные типы месторождений полевошпатового сырья представлены гранитными пегматитами, гранитоидами, нефелиновыми и щелочными сиенитами, вулканическими и субвулканическими образованиями. Наибольший интерес в промышленности представляет высококалийное полевошпатовое сырье, используемое в основном в электротехнической и керамической промышленности. Тем не менее, в связи с расширением рынка и растущими потребностями в полевошпатовом сырье в мире все больше возрастает роль гранитов – аляскитов, рапакиви, аркозовых и полевошпат-кварцевых песков и др. [1]. На базе месторождений данных видов минерального сырья, слагающих огромные массивы, возможна организация крупных производств по выпуску полевошпатовой продукции различного назначения. В Карелии эти перспективные источники полевошпатового сырья различного назначения представлены гранитами (рапакиви, аляскитовые и пегматоидные), образованиями кислого вулканогенного комплекса (кварцевые порфиры, ортофиры, геллефлинты) и щелочными интрузиями [2].

Одним из наиболее крупных объектов не традиционного полевошпатового сырья является комплекс анортозитов-рапакиви гранитов Салминского батолита, расположенный на восточном берегу Ладожского озера (южная Карелия). Батолит состоит из собственно

Салминского массива, локализованного в пределах Ладожской складчатой области, и его сателлита, Улягского массива, целиком расположенного в породах Карельского кратона [3]. Главной разновидностью развитых здесь пород, слагающих около 70 % его площади, являются типичные розовые биотит-роговообманковые граниты рапакиви. Они характеризуются присутствием крупных (до 3–4 см в диаметре) овоидов К-Na полевого шпата (так называемые питеклиты). Во многих случаях овоиды окружены каемкой олигоклаза (выборгиты).

Граниты рапакиви относятся к калиевым гранитам с характерными высокими содержаниями Rb, Pb, Nb, Ta, Zr, Hf, Zn, Ga, Sn, Th, U, F, REE (за исключением Eu) и низкими Ca, Mg, Al, P, Sr. Данные распределения РЗЭ гранитов рапакиви Салминского массива (рис. 1) отражают особенности их химического состава, где устанавливается наличие Eu аномалии, уменьшение содержания ЛРЗЭ и увеличение – ТРЗЭ [3]. Общий тренд эволюции РЗЭ, по-видимому, определялся фракционированием полевых шпатов, клинопироксена и роговой обманки, а также акцессорных минералов: циркона, флюорита (концентраторов ТРЗЭ) и алланита (концентратора ЛРЗЭ) [4].

Среди пород Салминского массива выделяют по крайней мере две фазы (см. рис. 2) становления гранитов рапакиви.

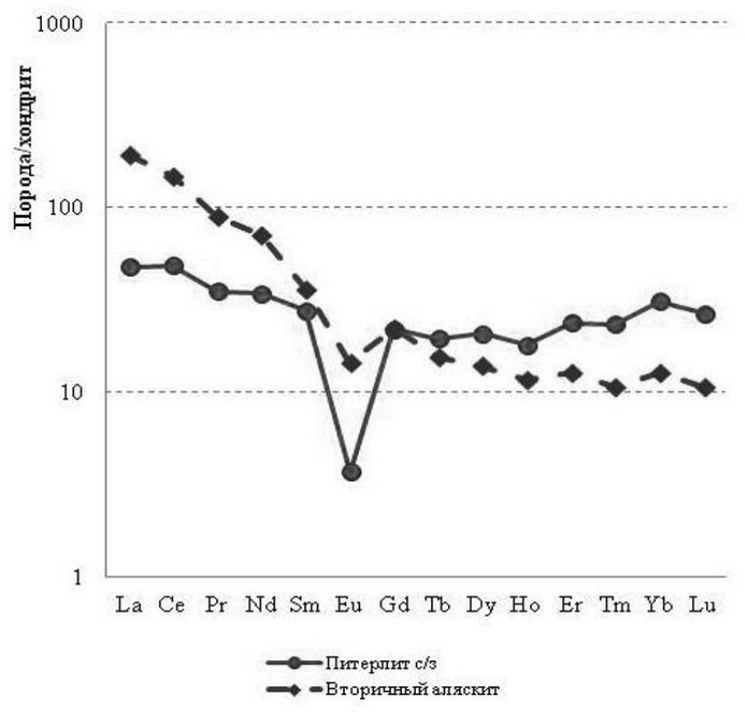


Рис. 1. Графики распределения РЗЭ в гранитах рапакиви Салминского массива, нормированные по хондриту

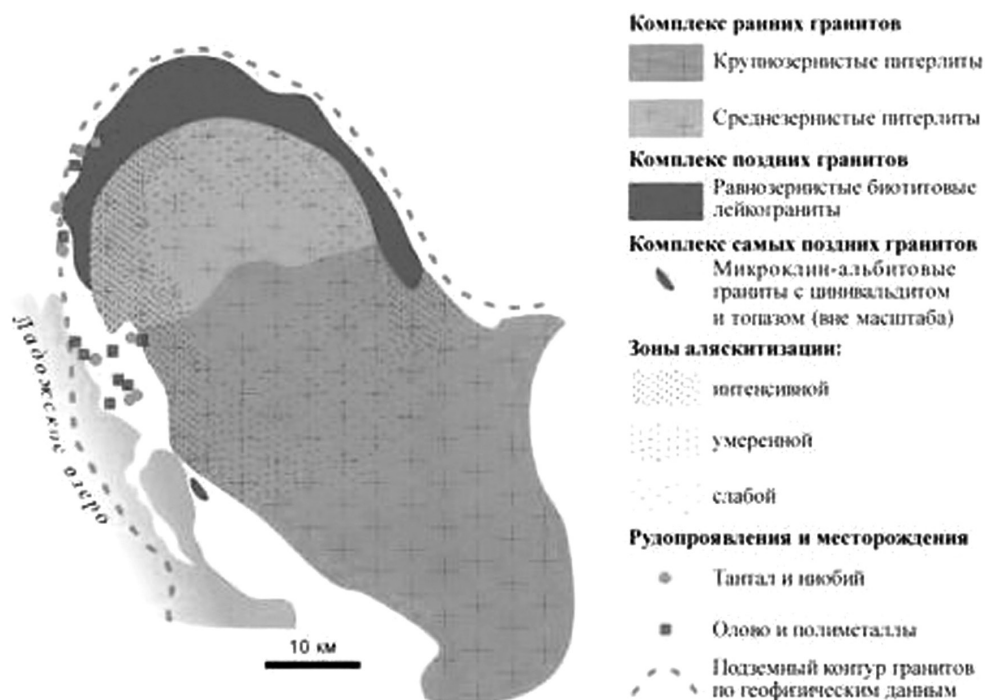


Рис. 2. Геологическая схема Салминского массива (по С. М. Бескину и др., 1983)

Более распространены крупнозернистые пегматиты, составляющие южную часть комплекса и отличающиеся большим размером порфировых вкрапленников (рис. 3а) и крайне неравнозернистой основной массой (до 2–3 мм) и сменяющие

их по направлению на северо-запад – среднезернистые пегматиты (рис. 3б).

Разновидность гранитов рапакиви, испытавших кремне-калиевый метасоматоз и перекристаллизацию, определяется, соответственно как,



«вторичный аляскит по питерлиту», поскольку «питерлит» в исходном смысле обозначает разновидность именно гранита рапакиви, а не метасоматита по нему (рис. 3в). Термин «вторичный аляскит» означает, что порода близка по составу и структуре к первично-магматическому аляскиту, но причиной такого приближения стали

кремне-калиевый метасоматоз и перекристаллизация других (не аляскитовых) гранитов [5].

Особенностью структуры гранитов рапакиви Салминского массива является очень малое число овоидов с плагиоклазовой оторочкой (не более 10 %). В связи с этим, все они в целом определены как питерлиты.

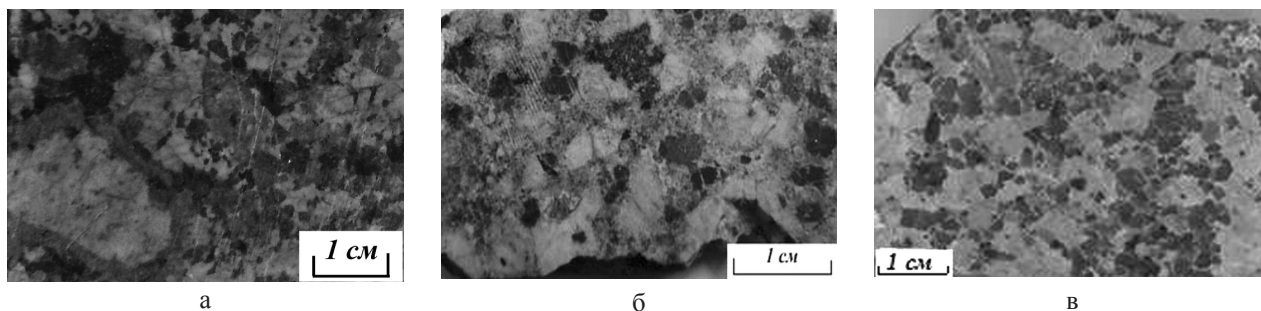


Рис. 3. Граниты Салминского массива: а- крупнозернистые питерлиты, б – среднезернистые питерлиты; в – вторичные аляскиты

Главными породообразующими минералами питерлитов являются микроклин, кварц, плагиоклаз и биотит. Характерно преобладание калиевого полевого шпата над плагио-

клазом. Наиболее обогащены микроклином вторичные аляскиты, возникшие в результате кремне-калиевого метасоматоза питерлитов (табл. 1).

Таблица 1. Минеральный состав питерлитов Салминского массива

Разновидность	Содержание в породе, % по массе				
	Плагиоклаз	Микроклин	Кварц	Биотит	Амфибол
Питерлит к/з	15	45	30	5	Менее 3
Питерлит с/з	17–19	37–44	34–46	2–3	Ед.
Вторичный аляскит	10	60	35	Ед.	-

В питерлитах микроклин представлен порфировыми вкрапленниками до 6–7 мм, как правило, с пертитовыми вростками, а также ксеноморфными кристаллами в основной массе, лишенными пертитов. Зерна основной массы и внешняя часть вкрапленников заметно пелитизированы. Иногда в приконтактной части фенокристаллов встречаются отдельные зерна кварца (округлые, гипидиоморфные, реже – гранофировые вростки). Кварц – от крупных (до 2–3 мм), до мелких (0,2–0,4 мм) зерен различной формы – гипидиоморфные по отношению к полевым шпатам. Плагиоклаз присутствует в виде пертитов или отдельных порфировых вкрапленников (рис 4).

Среди минеральных микровключений в микроклине (рис. 5) отмечается присутствие апатита, иногда содержащего до 2,5 %  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  и 2,32 %  $\text{Nd}_2\text{O}_3$ . Характерным включением, не только для микроклина, но и других минералов является циркон. Включения циркона отличаются по форме, сохранности и составу. По данным электронно-микроскопического сканирования

содержание оксида ниобия в отдельных зернах циркона достигает 3,2 %.

Питерлиты исследовались на сканирующем электронном микроскопе СЭМ VEGA II LSH. Установлена редкоземельная минерализация, связанная с мелкими (2–20 мкм), рассеянными ксенотимом, паризитом, монацитом, алланитом (рис. 6).

По данным микрозондовых анализов ксенотим ( $\text{YPO}_4$ ) содержит  $\text{Y}_2\text{O}_3$  – 33 %;  $\text{Gd}_2\text{O}_3$  – 3 %;  $\text{Dy}_2\text{O}_3$  – 7 %;  $\text{Yb}_2\text{O}_3$  – 10 %. Вариации состава паризита (теоретическая формула  $\text{Ca}(\text{Ce}, \text{La})_2 \times [\text{CO}_3]_3\text{F}_2$ ) –  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  24–30 %;  $\text{La}_2\text{O}_3$  – 11–17 %;  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  – 7–15 %,  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  – до 2 %,  $\text{Y}_2\text{O}_3$  – до 2,0 %. Характеристический спектр паризита по данным (СЭМ VEGA II LSH) (рис. 7).

Содержание РЗЭ в монаците ( $\text{Ce}, \text{La}, \text{Nd}, \text{Th}$ )  $[\text{PO}_4]$  –  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  – 3–36 %,  $\text{La}_2\text{O}_3$  – 7–14 %;  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  – 9–14 %,  $\text{Y}_2\text{O}_3$  – 4 %,  $\text{Pr}_2\text{O}_3$  – 1,6 %,  $\text{ThO}_2$  – 2–3 %.

Алланит –  $(\text{Ca}, \text{Ce}, \text{La}, \text{Y})_2(\text{Al}, \text{Fe})_3(\text{SiO}_4)_3(\text{OH})$  – содержит повышенное количество церия –  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  – 29 %; а также  $\text{La}_2\text{O}_3$  – 15 %;  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  – 8 %.

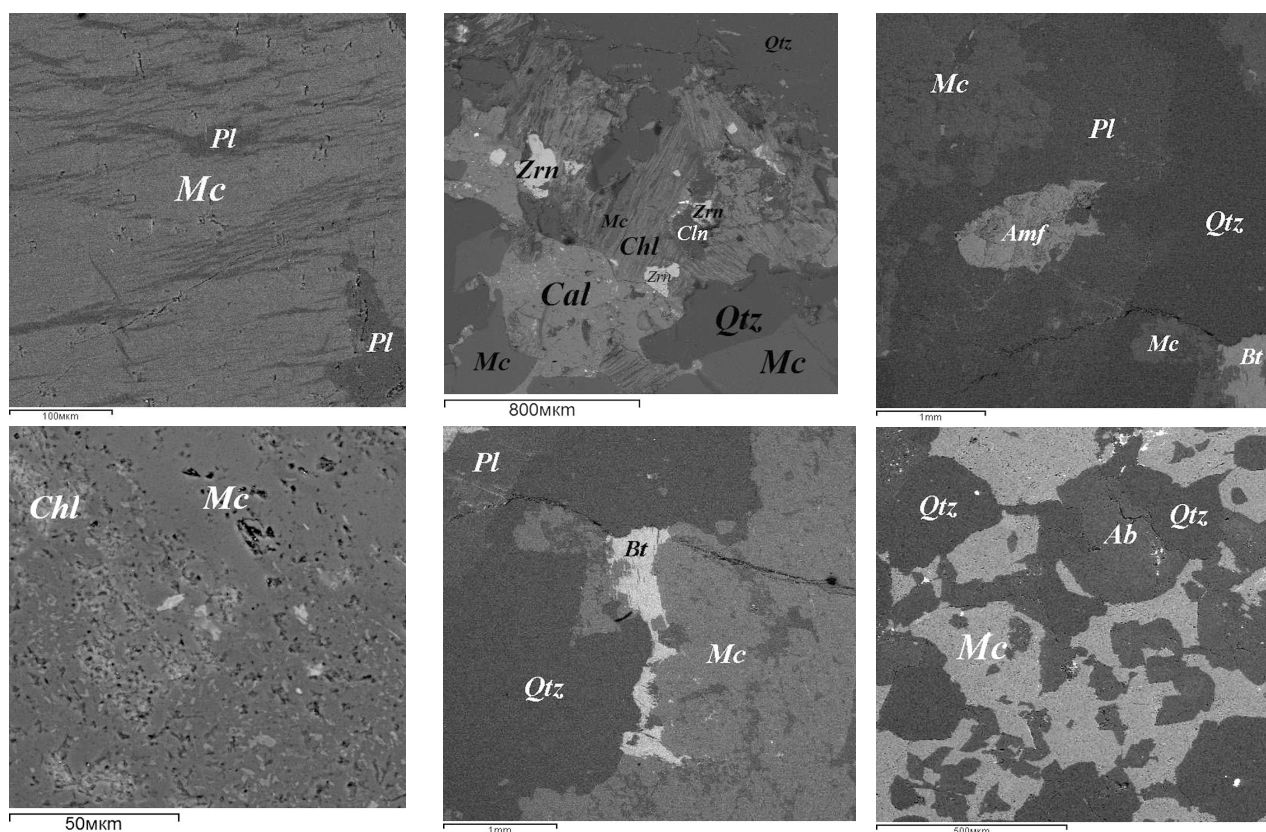
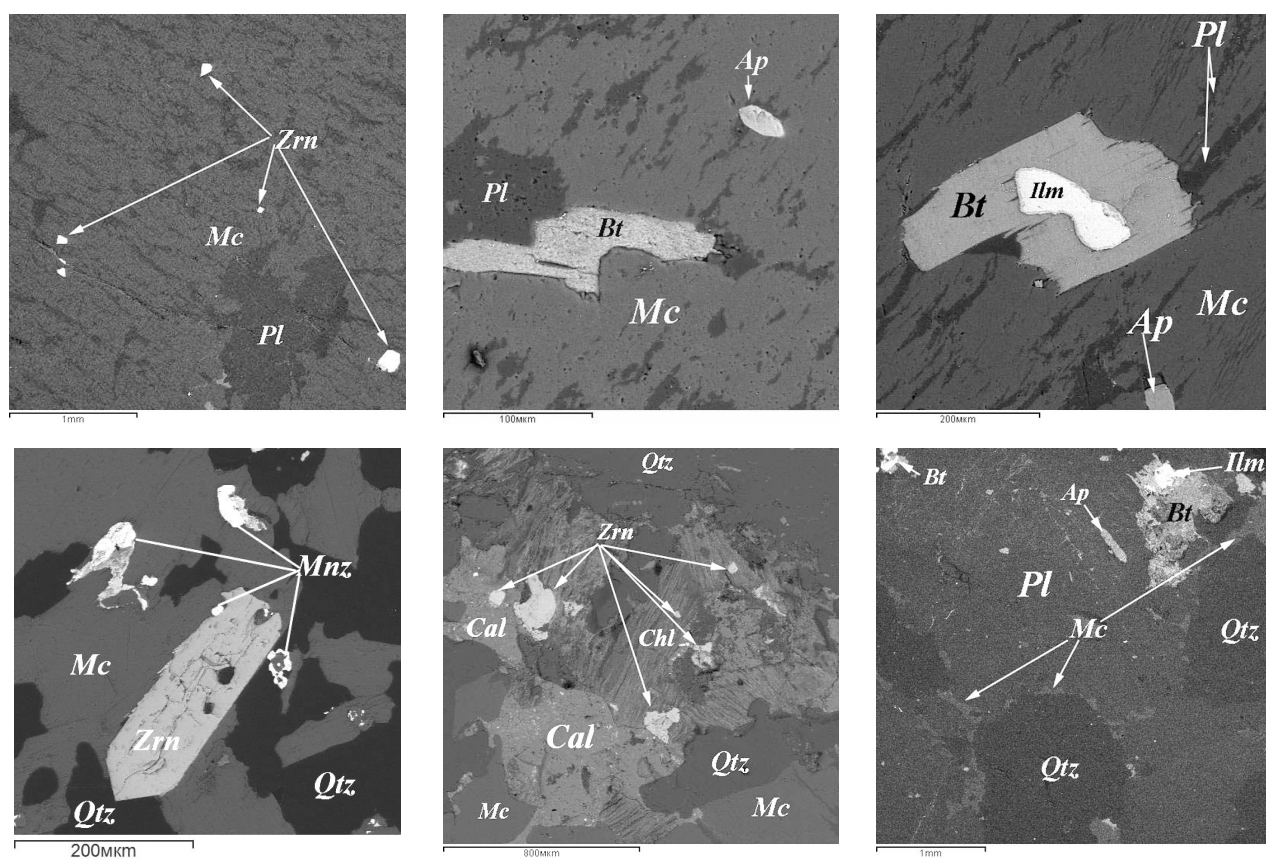


Рис. 4. Структурные особенности пирокситов (СЭМ VEGA II LSH)





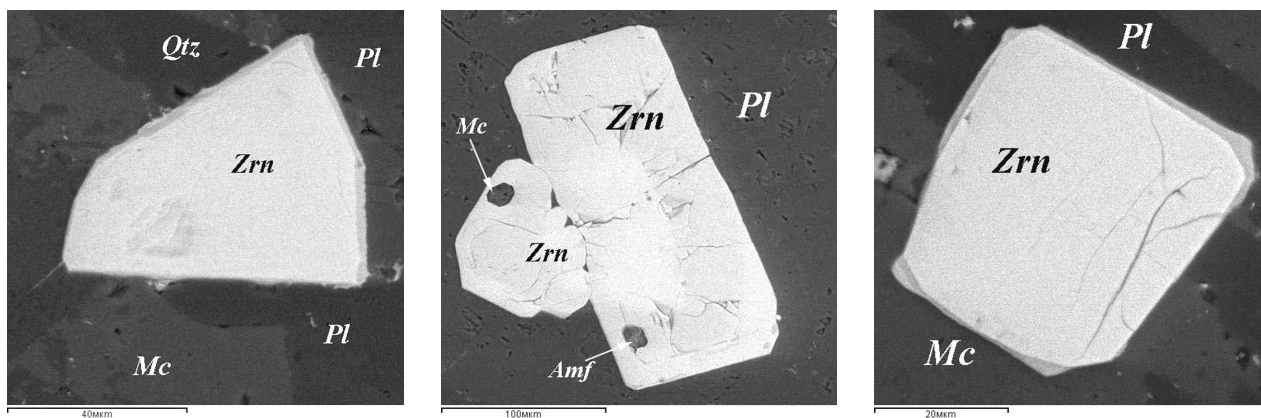


Рис. 5. Минеральные микровключения в микроклине (СЭМ VEGA II LSH)

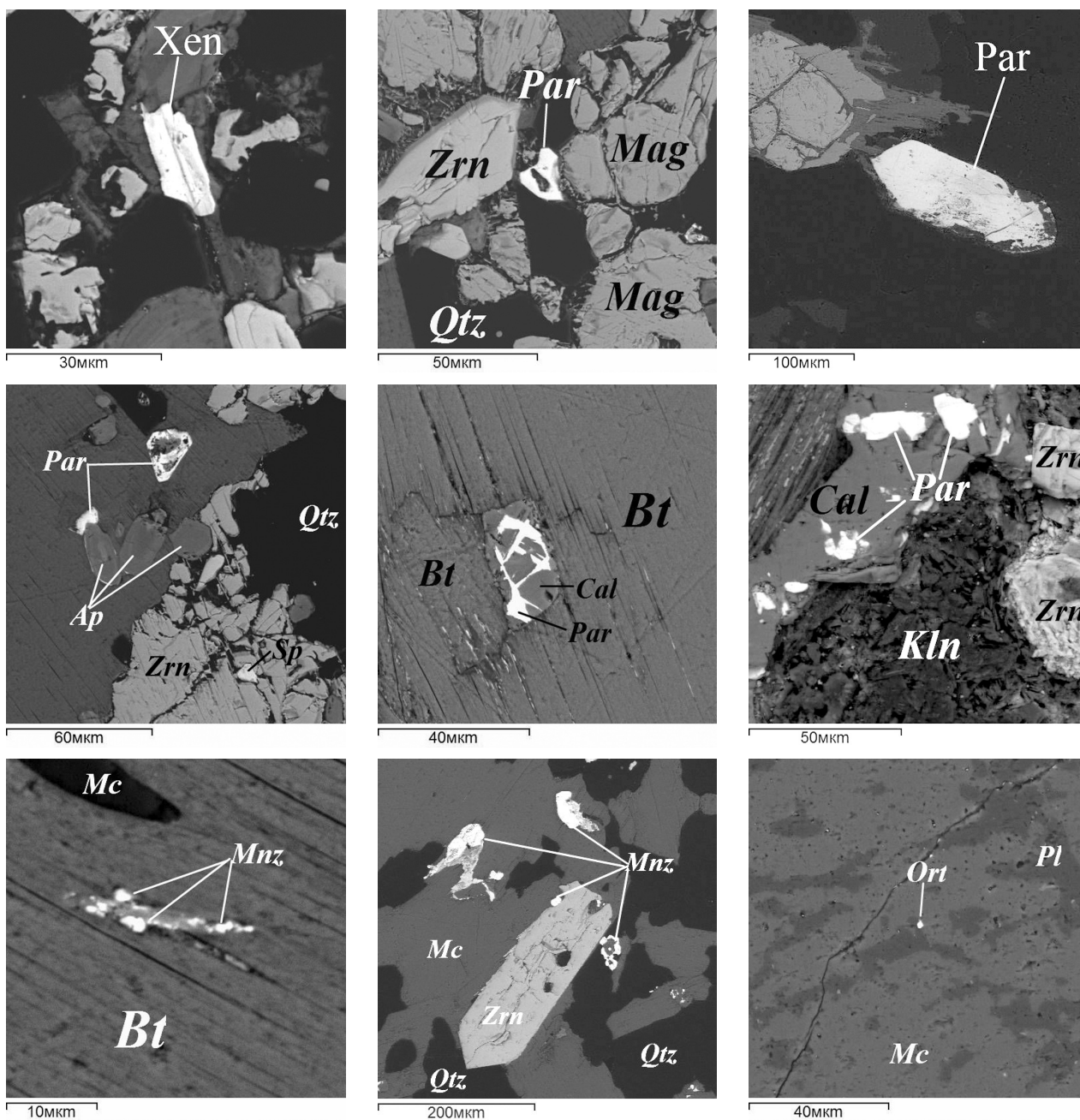


Рис. 6. Редкоземельная минерализация питеклитов (СЭМ VEGA II LSH)

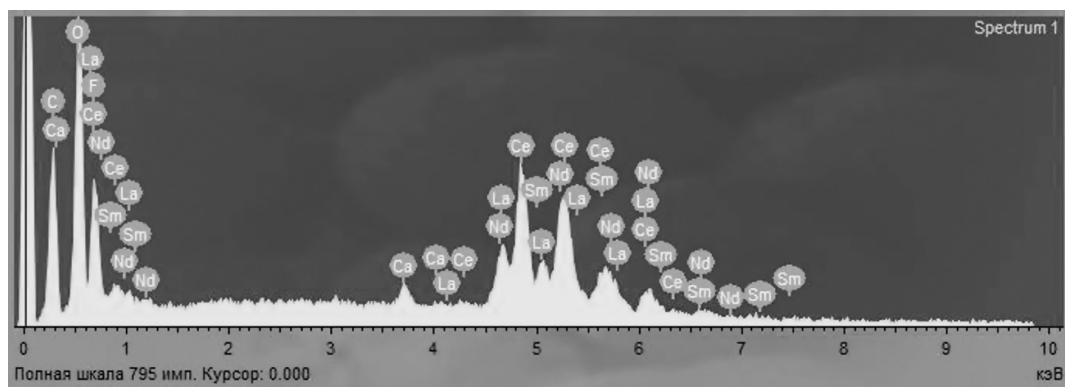


Рис. 7. Характеристический рентгеновский спектр паразита

Полнопроявленный вторичный аляскит состоит в основном из идиоморфных или гипидиоморфных зерен калишпата (0,5–3 мм до 1 см), окруженных гипидиоморфными зернами кварца размером от 0,1–0,2 до 5 мм. Кварц группируется в гнезда и цепочки. Минеральный состав аля-

скита: кварц (35 %), калиевый полевой шпат (до 60 %), плагиоклаз (менее 10 %),

По данным РСА-анализа калиевый полевой шпат представлен ортоклазом (рис. 8), результаты расчетов моноклинной упорядоченности даны в табл. 2.

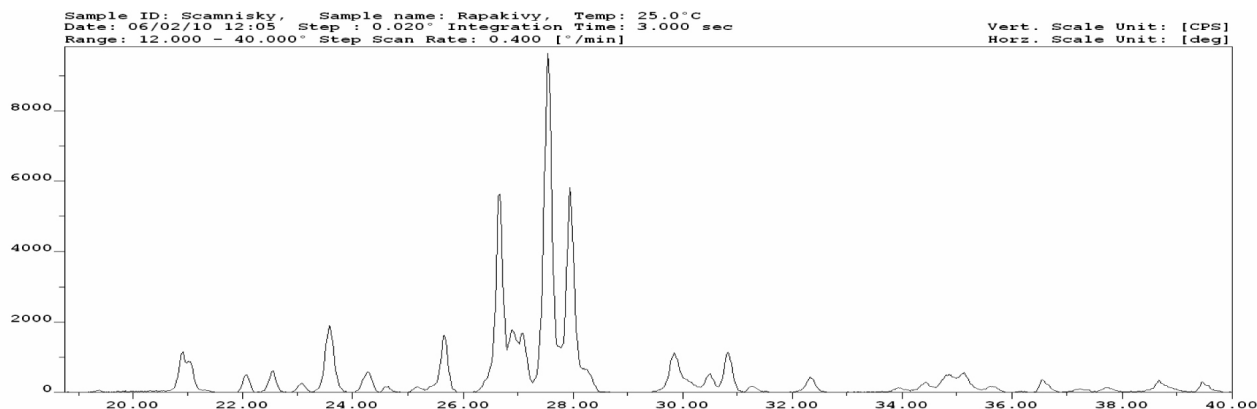


Рис. 8. Результаты рентгенографирования мономинерального калиевого полевого шпата из аляскитов

Таблица 2. Расчет моноклинной и триклинной упорядоченности калиевого полевого шпата

Порода	$\Delta 2\theta_{(131)}$	$2\theta_{060}$	$2\theta_{(204)}$	$t_1\theta$	$t_1m$	$t_2\theta=t_2m$
Вторичный аляскит по питерлиту (Пр 2–17)	0	41,82	50,71	0,85	15	0

Темноцветные минералы представлены ксеноморфными кристаллами и агрегатами биотита, размером до 0,3 мм. Калиевый полевой шпат сильно изменен (сплошная пелитизация), наиболее крупные зерна представляют собой простые двойники. Внутри порфилобластов ортоклаза по данным определения минеральных включений на сканирующем электронном микроскопе VEGA II LMU наблюдаются мелкие округлые включения кварца (разм. 0,03–0,06 мм) рутила (размером 10–30 мкм и менее), реже распространены включения апатита, флюорита, карбонатов (рис 9).

Калиевый полевой шпат-ортоклаз, характеризуется низким содержанием оксидов железа.

Участки с ортоклазом повышенной железистости крайне редки (табл 3).

Характерной особенностью ортоклаза является широкое развитие включений с редкоземельными элементами: циркона, размером зерен 0,05–0,2 мм, монацита, торита, паразита, ксенотима (рис. 10).

В северной части, на границе Салминского массива (рис. 2) располагаются лейкограниты, в пробах которых, по данным микрозондового анализа также обнаружена редкометалльная минерализация в виде колумбита ( $\text{FeNb}_2\text{O}_6$ ) с содержанием  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  – 71 %,  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  – 2,2 %. В кальците содержится:  $\text{Y}_2\text{O}_3$  – 1–4 %, а в ассоциирующем с кальцитом паразите –  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  – 22–37 %,  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  – 10–13 %,  $\text{La}_2\text{O}_3$  – 9–16 % (рис. 11).



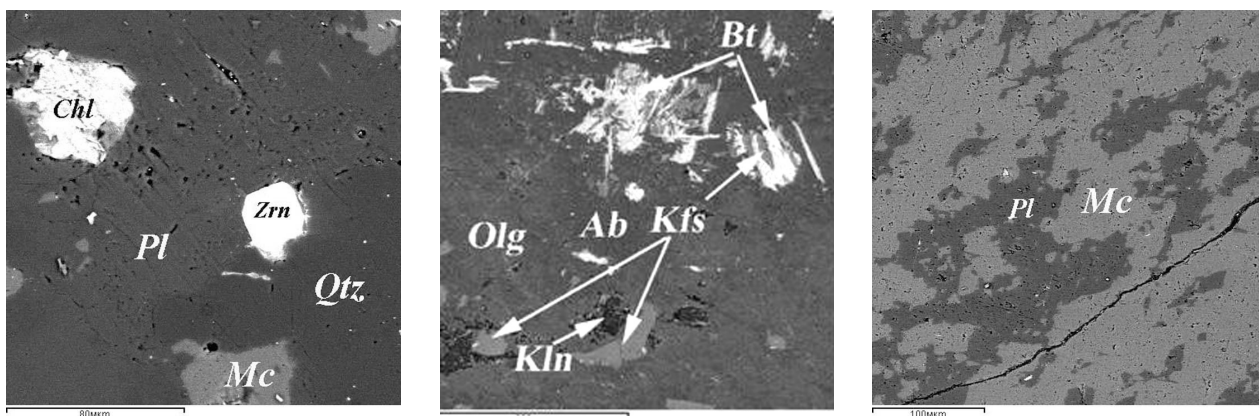
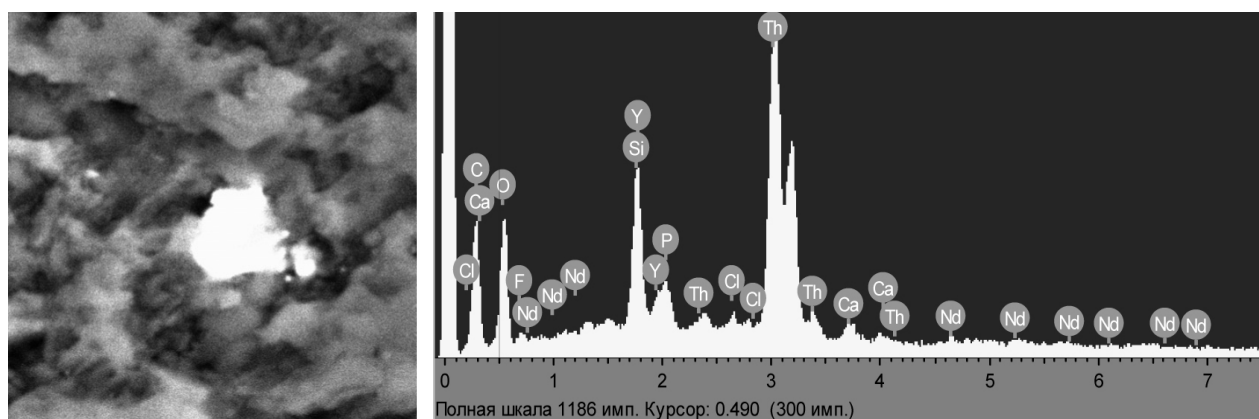


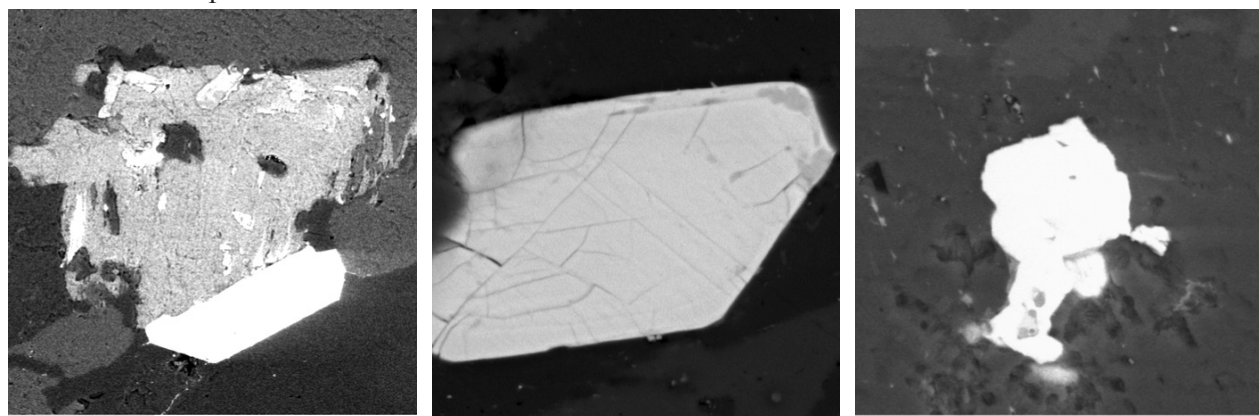
Рис. 9. Структурные особенности ортоклаза вторичных аляскитов (СЭМ VEGA II LSH)

Таблица 3. Состав породообразующих минералов по данным (СЭМ VEGA II LSH)

Минеральная фаза	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CaO
Ортоклаз	64,39	18,45	–	–	17,17	–
	64,83	18,21	–	0,87	16,09	–
Железистый ортоклаз	62,71	18,40	2,75	–	16,13	–
Вариации составов альбита (Ab)	68,35	19,16	–	12,49	–	–
	63,59	23,92	–	10,29	1,04	1,17
Олигоклаз (Olg)	62,00	24,59	–	9,96	0,77	2,67



1



2

3

4

Рис. 10. Включения в ортоклазе минералов с редкими и редкоземельными элементами:  
1 – торит и его спектр, 2 – рутил, циркон, сфен; 3 – циркон; 4 – монацит

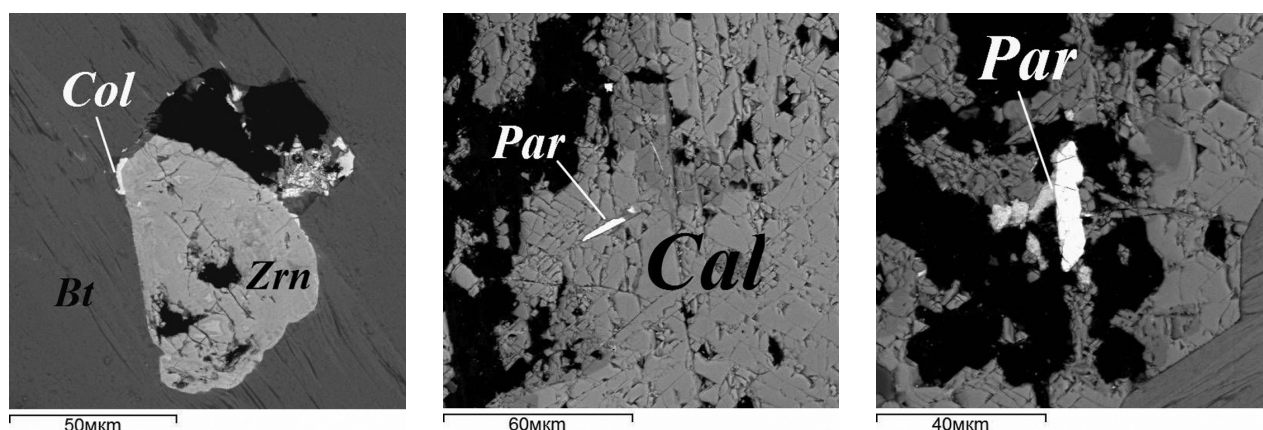


Рис. 11. Редкоземельная минерализация лейкогранитов (СЭМ VEGA II LSH)

Сравнение геохимических характеристик разновидностей рапакиви показывает их существенные отличия. (рис. 12). По данным ICP

AES для аляскитов характерны повышенные содержания неодима – до 35г/т, церия – 90г/т, циркония – 190г/т.

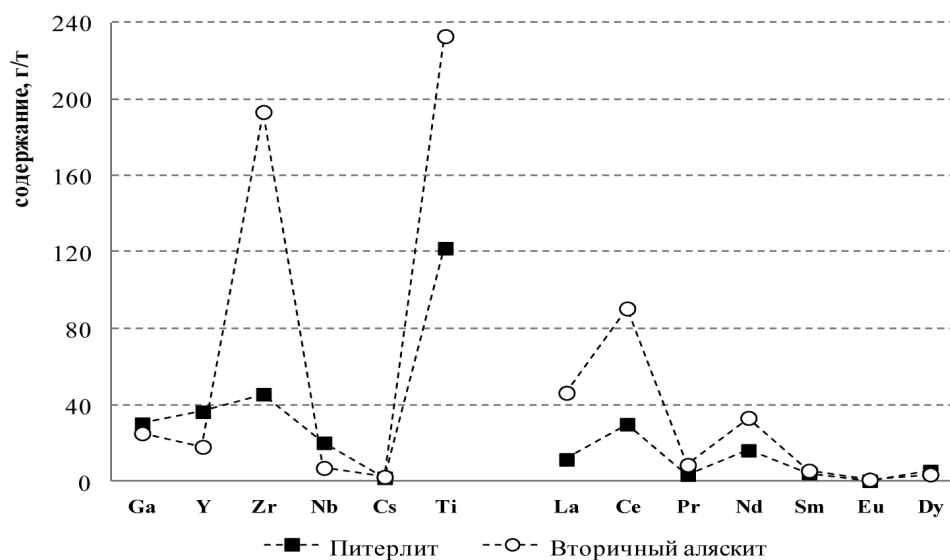


Рис. 12. Геохимическая характеристика разновидностей рапакиви

Анализ геохимического состава ортоклаза из аляскитов показал, что количество отдельных эле-

ментов определяется наличием включений и не зависит от чистоты и крупности минерала (табл. 4).

Таблица 4. Геохимическая характеристика рапакиви и ортоклаза аляскита в зависимости от крупности и чистоты продукта

Элемент	Предел обнар, ppm	Содержание, ppm								
		Вторичный аляскит	питерлит	Вторичный аляскит ортоклазовый продукт по фракциям, мм						
				20–10			10–5			2,5–0
Фракция		Исходный	Исходный	чистый	загрязнен	сильно загр.	чистый	загрязнен	сильно загр.	чистый
Li	0,3	20,46	22,86	13,16	19,07	22,93	12,52	21,06	22,06	18,26
Be	0,1	4,24	3,97	3,34	4,23	5,09	3,45	4,62	4,4	4,72
Ti	17,43	233,02	121,98	133,02	251,82	284,54	209,9	303,1	226,86	206,22
Mn	2,26	66,42	16,91	50,34	56,14	70,82	52,62	81,45	60,97	60,44
Co	0,06	0,22	–	0,15	0,28	0,22	0,32	0,5	0,21	0,43
Ni	1,01	12,86	–	5,96	14,82	11,78	5,3	8,49	5,22	6,43

Элемент	Предел обнар, ppm	Содержание, ppm								
		Вторич ный аляс- скит	питерлит	Вторичный аляскит <b>ортоклазовый продукт по фракциям, мм</b>						
				20–10			10–5			2,5–0
Фракция		Исходный	Исходный	чистый	загрязнен	сильно загр.	чистый	загрязнен	сильно загр.	чистый
Cu	1,44	18,91	4,83	3,56	19,87	19,35	2,62	5,91	2,87	3,4
Zn	25,06	–	–	–	27,86	35,97	25,3	34,41	–	38,49
Ga	0,42	25,09	30,09	21,24	21,82	22,2	24,69	24,5	19,36	23,67
Rb	0,52	244,14	357,02	342,54	284,06	205,66	351,9	281,66	181,42	245,02
Sr	1,08	45,05	6,83	67,83	49,95	37,46	62,9	52,3	32,94	40,55
Y	0,05	18	36,34	9,7	17,05	23,14	12,19	20,34	18,86	17,36
Zr	0,81	193,34	45,54	71,73	117,26	173,18	91,18	159,10	178,38	112,22
Nb	0,04	6,93	20,08	4,42	7,3	7,98	5,93	8,47	6,06	5,34
Mo	0,12	3,94	0,18	1,39	1,4	2,11	224,35	2,27	9,78	1,76
Cd	0,1	1,71	0,7	0,82	1,21	1,73	1,1	1,52	1,62	1,21
Sn	0,66	1,55	3,98	1,74	1,89	1,58	1,49	1,70	1,35	1,5
Cs	0,04	2,27	1,78	3,29	2,57	1,95	3,03	2,59	1,74	2,11
Ba	24,12	703,18	50,46	1619	947,02	351,42	1309,42	826,22	237,34	508,7
La	0,05	46,29	11,39	21,98	53,84	63,78	37,5	59,92	47	56,14
Ce	0,06	90,44	29,82	45,15	104,52	–	74,29	121,16	92,36	109,56
Pr	0,03	8,51	3,36	3,65	10,01	–	6,89	11,28	9,24	10,67
Nd	0,04	33,13	16,13	15,54	39,04	–	27,26	44,55	36,75	41,72
Sm	0,03	5,49	4,26	2,66	6,38	–	4,45	7,27	5,92	6,48
Eu	0,03	0,84	0,22	1,46	1,03	–	1,34	0,99	0,53	–

Примечание. «–» означает, что содержание элемента ниже порога определения.

Полученные результаты не противоречат данным, приведенным А. М. Лариным. [3] [4]. Крупнофильные литофилы (Cs, Rb, Ba, Sr) в составе пород и ортоклаза связаны с изоморфными замещениями. В ортоклазе из аляскитов содержание легких РЗЭ закономерно увеличивается от крупных к мелким фракциям, независимо от сте-

пени чистоты фракций. Выявленные отличия в геохимическом характере рапакиви, представленных питерлитами и вторичными аляскитами, проявленные в контрастных уровнях концентрации редких и редкоземельных элементов, важны при определении промышленной значимости пород и выборе направлений использования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Баланс запасов полезных ископаемых Российской Федерации. Полевошпатовое сырье. Вып. 52. М. 2013
2. Скамницкая Л. С., Бубнова Т. П. Полевошпатовое сырье Республики Карелия: состояние и перспективы освоения // Горный журнал. 2012. № 5. С. 23–26.
3. Ларин А. М. Граниты рапакиви и ассоциирующие породы. – СПб.: Наука, 2011. – 402 с.
4. Neymark L. A., Amelin Yu. V., Larin A. M. Pb-Nd-Sr isotopic and geochemical constraints on the origin

of the 1.54–1.56 Ga Salmi rapakivi granite-anorthosite batholith (Karelia, Russia) // Mineral. Petrol. 1994. V. 50. P. 173–193.

5. Петров Д. А. Количественная характеристика и петронетическая интерпретация структуры гранитов рапакиви Салминского массива (Карелия). Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук. Специальность 25.00.04 – Петрология, вулканология. СПб., 2008. 20 с.

## МЕТАЛЛЫ В ПРОДУКТАХ ПЕРЕРАБОТКИ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТЫХ ШУНГИТОВЫХ ПОРОД ЗАЖОГИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

**Садовничий Р. В., Рожкова Н. Н.**

*ИГ КарНЦ РАН, г. Петрозаводск*

### Введение

В настоящее время одним из наиболее востребованных и перспективных направлений ис-

пользования шунгитовых пород является водоочистка, в том числе и подготовка питьевой воды. Эффективность применения шунгитовых пород



в данной сфере обусловлена их адсорбционными и каталитическими свойствами [3]. При этом в процессе подготовки питьевой воды необходимо учитывать сложный и непостоянный химико-минералогический состав шунгитовых пород, оказывающий влияние на эффективность водоочистки.

Основу шунгитовых пород Зажогинского месторождения составляет микрозернистый углерод-кварцевый агрегат, содержащий в незначительном количестве зёрна мусковита, биотита, полевых шпатов, сульфидов, карбонатов и других минералов [7]. В состав шунгитовых пород входят многочисленные кварц-сульфидные жилы и прожилки различной мощности, а также миндалевидные включения кварца, пирита и шунгита I разновидности [2]. В шунгитовых породах Зажогинского месторождения фиксируются различные рудные минералы, представленные сульфидами (пирит, халькопирит, сфалерит, молибденит, галенит, миллерит), окислами (магнетит, гематит, рутил, ильменит), а также титанит, монацит и другие.

Как показали исследования [4], самородная сера и сульфиды шунгитовых пород при взаимодействии с водной средой в результате ряда химических реакций вызывают уменьшение её pH. По результатам ранее проведенных исследований уже отмечалось влияние технологических процессов подготовки шунгитового сырья на содержание тяжелых металлов в продуктах выщелачивания [4, 5]. В то же время поведение тяжелых металлов при водной обработке шунгитовых пород требует более детального изучения. Учитывая широкое применение шунгитовых пород в процессах водоочистки, а также перспективу их использования в курортологии и биомедицине, решение данной задачи имеет важное значение. В связи с этим целью данного исследования являлось изучение минерально-химического состава материала, вымываемого из шунгитовых пород при их взаимодействии с водой различной щёлочности и температуры, и, в частности, определение содержания в нём различных металлов.

#### Объекты и методы

Объектами исследования выбраны образцы шунгитовой породы-III (третья разновидность) Зажогинского месторождения [2], содержание углерода в которой составляет около 34 вес. %. Образцы различались по гранулярному составу – крошка фракции 2–10 мм (масса образца

200 г) и порошок фракции 0,05 – 2 мм (масса образца 100 г).

Все образцы помещались в стеклянные и керамические колбы и заливались водными растворами различной щёлочности при  $t=25^{\circ}\text{C}$ : дистиллированной, слабощелочной ( $\text{pH} > 7$ ) и слабокислой ( $\text{pH} < 7$ ) водой; соотношение порода/раствор составляло 1/6 – 1/3. Раствор регулярно перемешивали и через определённое время фильтровали (размер ячеек фильтра составлял 1–2 мкм). Полученный фильтрат выпаривали до получения сухого остатка. Затем сухой остаток взвешивался и анализировался. Взвешивание производилось на весах KERN–770, точность измерения составляла  $\Delta=0,0001$  г. Таким образом изучалась кинетика выщелачивания материала. Оставшийся на фильтре шунгитовый материал вновь заливался соответствующим раствором. Данные процедуры проводились пять раз, продолжительность каждого этапа выщелачивания составляла от 4 (в начале эксперимента) до 43 суток (в конце эксперимента). Для образцов шунгитового порошка дополнительно проводилось изучение влияния температуры на интенсивность выщелачивания (данный эксперимент был проведен однократно, без изучения кинетики выщелачивания). Для этого порошок заливался тремя аналогичными растворами и выдерживался на водяной бане; температура раствора при этом составляла около  $100^{\circ}\text{C}$ .

Полученный фильтрат анализировался рентгенофазовым (установка Arl X'tra X-ray Diffractometer с  $\text{CuK}\alpha$  излучение), атомно-абсорбционным (атомно-абсорбционный спектрофотометр Perkin Elmer 703) и ICP MS (квадрупольный масс-спектрометр X-SERIES-2 фирмы Terhmo scientific) методами.

#### Результаты

По результатам изучения кинетики выщелачивания шунгитовых пород путём регулярного измерения массы фильтрата определилась следующая закономерность: большая часть материала выщелачивается на начальной стадии процесса (от 52 % до 75 % от общей массы фильтрата, полученного за всё время эксперимента) до равновесного режима. На кинетику выщелачивания существенное влияние оказывает гранулярный состав образцов. Из крошки на начальных этапах вымывается значительно больше материала, чем из порошка (относительная масса фильтрата на первом этапе для крошки состав-



ляла 0,75–0,82 %, для порошка – 0,28–0,34 %). При этом различная кислотность среды выщелачивания заметно не сказывается на её интенсивности. В итоге, на последнем этапе наблюдается значительное сближение значений масс вымытого материала для всех образцов, независимо от гранулярного состава и среды выщелачивания. На последнем этапе относительная масса фильтрата для образцов шунгитовой крошки составляла 0,02–0,0452 %, порошка – 0,0157–0,0653 %).

Повышение температуры раствора оказывает существенное влияние на интенсивность выщелачивания: при нагревании из порошка шунгита вымывается почти в два раза больше материала. Относительная масса фильтрата, полученного без нагревания раствора, составляла 0,28–0,34 %, при нагревании – 0,5–0,66 %. Схематично зависимость массы выщелачиваемого материала от времени, прошедшего с начала эксперимента, показана на рис. 1.

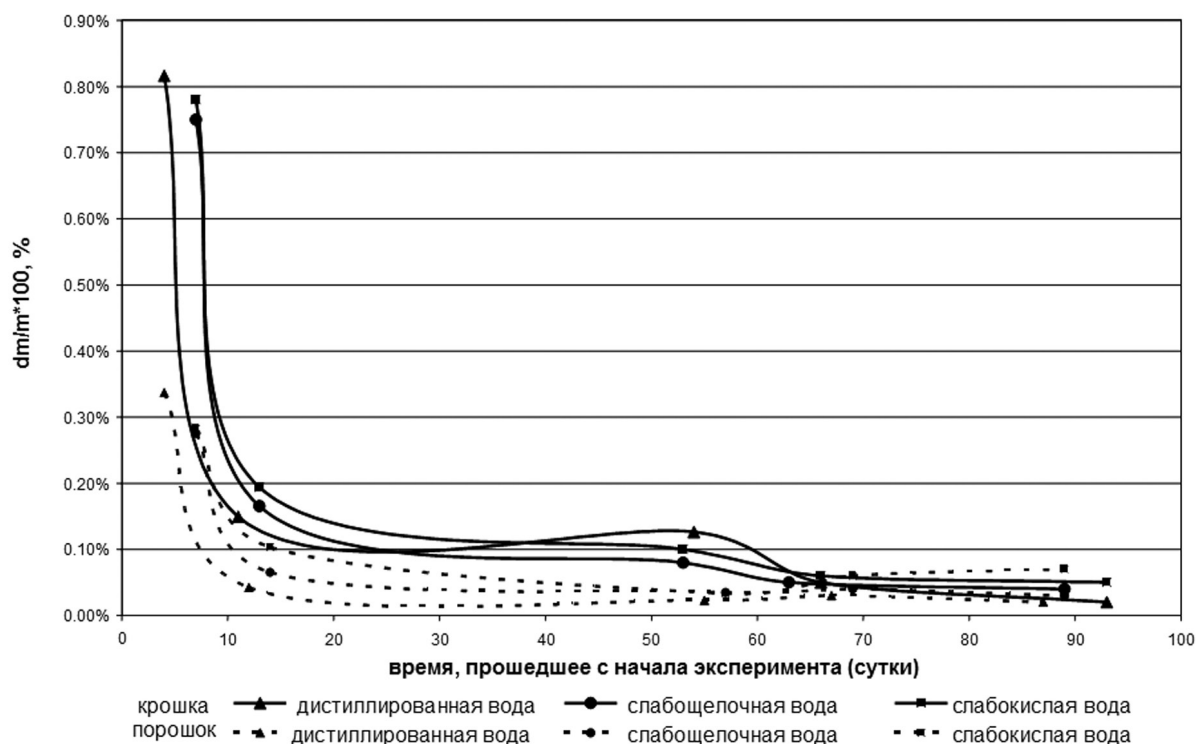


Рис. 1. Кинетика выщелачивания материала из крошки и порошка шунгитовой породы:  $dm/m$  – относительная масса вымываемого материала, где  $dm$  – масса фильтрата,  $m$  – масса исследуемого образца

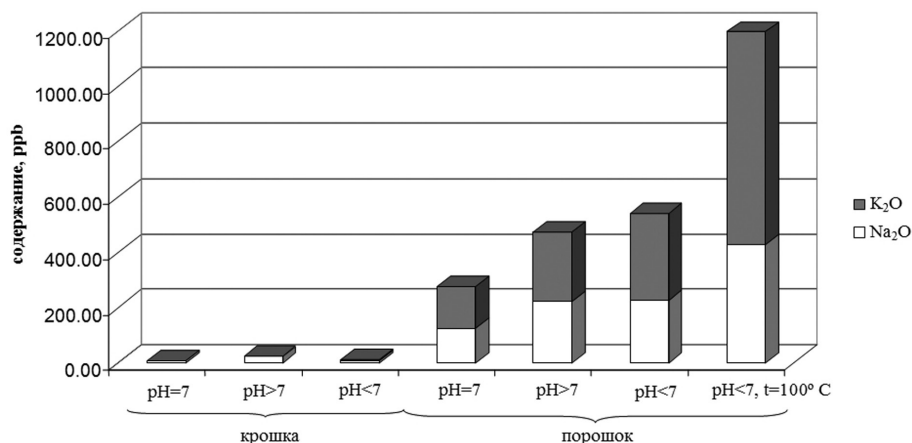
Минеральный состав фильтратов исследовался методом рентгенофазового анализа. Согласно полученным результатам, основными минералами фильтрата шунгитовой крошки являются водные и безводные сульфаты (ангидрит, ромбоклаз, дворникит и другие), в состав которых входят катионы **Ca, K, Na, Fe, Al, Ni и Zn**. В меньшей степени в фильтрате представлены силикаты. Фильтрат шунгитового порошка также состоит преимущественно из водных и безводных сульфатов, при этом почти все они являются соединениями щелочных и щелочноземельных металлов – **K, Na, Ca, Mg** (гипс, шенит, бассанит). Результаты рентгенофазового анализа представлены в таблице 1 (для некоторых минералов приводится только их химическая формула).

Преимущественно сульфатный состав продуктов выщелачивания можно объяснить реакциями окисления сульфидов, происходящими при их взаимодействии с водой, растворённым в ней кислородом и серной кислотой, образование которой, в свою очередь, связано с процессами окисления самородной серы, входящей в состав шунгитовых пород [4].

Изучение химического состава полученного фильтрата проводилось методами атомной абсорбции и ICP MS. Атомно-абсорбционный метод применялся для определения содержания в образцах щелочных металлов – **K и Na**. Результаты анализа образцов, выщелачивание которых шло при различной температуре, представлены на рис. 2 в виде диаграммы.

Таблица 1. Минеральный состав фильтрата

Тип раствора		Минеральный состав фильтрата	
pH	t, °C	крошка	порошок
7	25	Гипс – $\text{Ca}(\text{SO}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ $\text{Al}_4\text{H}_2(\text{SO}_4)_7 \cdot 24\text{H}_2\text{O}$	Бассанит – $\text{Ca}(\text{SO}_4) \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ Пикромерит – $\text{K}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ Гипс – $\text{Ca}(\text{SO}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ Крёнкит – $\text{Na}_2\text{Cu}(\text{SO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
	100		Бассанит – $\text{Ca}(\text{SO}_4) \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ Сингенит – $\text{K}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ $\text{Ca}(\text{SO}_4) \cdot 0,6\text{H}_2\text{O}$
<7	25	Ромбиклаз – $\text{FeH}(\text{SO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ Дворникит – $(\text{Ni}, \text{Fe})\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ Ангидрит – $\text{Ca}(\text{SO}_4)$ Вольтаит – $\text{K}_2\text{Fe}_5\text{Fe}^{3+}\text{Al}(\text{SO}_4)_{12} \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ $\text{Zn}_6(\text{OH})_2\text{Zn}(\text{SO}_4) \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	Гипс – $\text{Ca}(\text{SO}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ $\text{K}_4\text{CaSi}_3\text{O}_9$
	100		Бассанит – $\text{Ca}(\text{SO}_4) \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$
>7	25	Суолунит – $\text{Ca}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ Эттрингит – $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$ Явапайит – $\text{KFe}(\text{SO}_4)_2$ Ганнингит – $\text{Zn}(\text{SO}_4) \cdot \text{H}_2\text{O}$ $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_7$ $\text{Na}_3\text{Fe}(\text{SO}_4)_3$	Гипс – $\text{Ca}(\text{SO}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
	100		Ангидрит – $\text{Ca}(\text{SO}_4)$ Кальциолангбейнит – $\text{K}_2\text{CaMg}(\text{SO}_4)_3$

Рис. 2. Содержание  $\text{K}_2\text{O}$  и  $\text{Na}_2\text{O}$  в образцах фильтрата

Согласно полученным результатам, выщелачивание щелочных металлов из порошка шунгитовой породы происходит в сотни раз интенсивней, чем из крошки. При этом максимальный эффект достигается при нагревании раствора. Хорошо прослеживается влияние среды выщелачивания на её интенсивность, т. е. при взаимодействии шунгитовой породы с дистиллированной водой количество **К** и **Na**, переходящих в раствор, минимально как для крошки, так и для порошка. Доля компонентов в продуктах выщелачивания различна для исследуемых образцов, а именно: в фильтрате шунгитовой крошки наблюдается преобладание  $\text{Na}_2\text{O}$  (содержание  $\text{Na}_2\text{O}$  5,63 – 21,63 мкг/мл, содержание  $\text{K}_2\text{O}$  1,7 – 3,52 мкг/мл), в фильтрате порошка –  $\text{K}_2\text{O}$  (содержание  $\text{Na}_2\text{O}$  123,1 – 226,14 мкг/мл,

содержание  $\text{K}_2\text{O}$  151,34 – 313,68 мкг/мл – для раствора при  $t=25^\circ\text{C}$ ).

Как показали результаты масс-спектрального анализа, в фильтрате шунгитовой крошки содержится значительно больше таких элементов, как **Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Y, Cd, Be, Sc, U, REE** чем в фильтрате порошка, но меньше **Mn, Rb, Sr, Ba**. Повышение температуры раствора при обработке шунгитового порошка до  $100^\circ$  существенно усилило интенсивность выщелачивания данных элементов. В табл. 2 приведены содержания указанных выше компонентов в полученных образцах фильтрата крошки и порошка шунгитовой породы при обработке их растворами различной щёлочности и температуры. В нижней строке указано содержание этих же элементов в исходной шунгитовой породе **III разновидности** (Забогинское месторождение).

Таблица 2. Содержание в образцах фильтрата основных выщелачиваемых элементов в сравнении с содержанием их в исходной породе

Образец	Тип раствора		Элементы														
	t	pH	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Rb	Sr	Ba	Y	Cd	Be	Sc	U	ΣREE
крошка		pH=7	994,86	1,963	541,17	10659,71	3642,97	8235,1	2,15	3,96	9,64	59,34	169,52	4,37	33,03	18,70	277,94
	t=25° C	pH<7	871,66	2,713	467,97	9467,71	4080,97	7027,1	1,49	3,88	4,58	51,98	160,08	4,13	31,44	22,61	262,60
		pH>7	894,86	1,969	495,97	9775,71	3442,17	7127,1	1,43	4,46	3,98	51,06	160,24	4,35	32,40	19,63	252,36
	порошок		pH=7	2095,66	0,030	13,45	138,51	25,14	79,82	54,22	298,28	49,98	0,11	1,57	0,00	0,00	0,11
t =25° C		pH<7	2924,06	0,014	24,89	260,91	22,28	135,70	64,34	405,20	75,62	0,10	3,28	0,00	0,00	0,05	0,36
		pH>7	2546,86	0,022	16,50	170,31	26,66	108,70	58,18	370,40	73,9	0,22	1,76	0,00	0,00	0,06	1,02
t =100° C		pH=7	5923,26	4,837	30,92	318,31	14,79	209,02	85,34	475,20	22,16	1,67	5,71	0,08	0,1	0,08	11,13
		pH<7	5683,89	2,350	46,32	417,97	35,13	247,97	84,05	560,37	39,71	2,72	6,67	0,15	0,14	0,11	20,09
исходная порода		pH>7	6327,26	4,329	39,12	377,23	45,61	256,86	69,86	443,60	23,68	2,29	6,20	0,14	0,00	0,05	11,14
			134,7	1,512	4,99	71,62	92,73	58,88	50,32	30,93	432,5	11,87	0,49	0,88	12,18	7,03	52,04

Примечание. содержание Fe дано в %, остальных элементов – в г/т.

Сравнение приведенных значений содержания указанных элементов показывает, что все они (за исключением **Ba**) **активно выщелачиваются** из шунгитовых пород при обработке их растворами различной щёлочности. При этом одни элементы интенсивно выщелачиваются только из шунгитовой крошки (**Cu, Y, Be, Sc, U, REE**), другие – из порошка (**Rb, Sr**), другие – из обоих образцов (**Mn, Fe, Co, Ni, Zn, Cd**). **Те элементы, которые не указаны в таблице либо практически не регистрируются в растворе (Ti, V, As, Zr, Nb, In, Ga, Sn, Cs, Hf), либо их содержание в фильтрате слабо отличается от содержания в исходной породе (Li, Cr, W, Mo, Sb, Pb).**

Интенсивное выщелачивание из шунгитовых пород таких элементов, как Fe, Cu, Ni, Zn, Cd, по всей видимости, связано с процессами окисления пирита, халькопирита, миллерита, сфалерита и других сульфидов, входящих в состав шунгитовых пород. Окисление данных минералов приводит к образованию водорастворимых сульфатов [4], которые, по результатам рентгенофазового анализа, составляют основу полученных образцов фильтрата. Присутствие в пробах Rb, Sr, Ba и Sc можно связать с реакциями разложения полевых шпатов и слюд, входящих в состав шунгитовых пород (это подтверждается повышенными содержаниями в фильтрате Na и K, которые входят в состав данных минералов). Более высокое содержание данных компонентов в фильтрате шунгитового порошка, чем в фильтрате крошки, вероятно, связано с тем, что благодаря уменьшению размера частиц породы происходит увеличение поверхности её контакта с раствором, что приводит к более интенсивному протеканию реакции. Редкоземельные элементы (REE) и Y в исходной шунгитовой породе связаны в монаци-

те, ортите, ксенотиме, паризите и других минералах [6]; форма нахождения данных элементов в фильтрате пока не установлена. Ввиду химической устойчивости монацита и высокой дисперсности его в породе (1–2 мкм) можно предположить его вымывание из исходной шунгитовой породы и концентрацию в фильтрате.

### Выводы

1. Процессы выщелачивания минералов шунгитовых пород наиболее интенсивно протекают на начальных стадиях обработки их водными растворами различной щёлочности и напрямую зависят от гранулометрии образца и температуры раствора.

2. Минеральный состав вещества фильтратов шунгитовых пород представлен преимущественно водными сульфатами и силикатами. Для образцов фильтрата, полученных при обработке шунгитовой крошки, характерны соединения Ca, K, Na, Fe, Al, Ni и Zn, порошка – Ca, K, Na, Mg.

3. Химический состав продуктов выщелачивания шунгитовых пород характеризуется повышенными по отношению к исходной породе содержаниями Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Y, Cd, Rb, Sr, Ba, Be, Sc, U, REE. Из образцов шунгитовой крошки (в сравнении с образцами порошка) более интенсивно выщелачиваются такие элементы, как Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Y, Cd, Be, Sc, U, REE, и менее – K, Na, Mn, Rb, Sr, Ba. Повышение температуры раствора значительно увеличивает интенсивность процесса выщелачивания.

4. Отмеченные особенности минерально-химического состава продуктов водной обработки шунгитовых пород указывают на необходимость предварительной очистки данного сырья при использовании его в процессах водоподготовки.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Атлас текстур и структур шунгитоносных пород Онежского синклиория / Ред. М. М. Филиппов, В. А. Мележик. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2006, 80 с.
2. Борисов П. А. Карельские шунгиты. Петрозаводск, 1956. 92 с.
3. Калинин Ю. К., Калинин А. И., Скоробогатов Г. А. Шунгиты Карелии – для новых стройматериалов, в химическом синтезе, газоочистке, водоподготовке и медицине. – СПб: УНЦХ СПбГУ, ВВМ, 2008. – 219 с.
4. Рафиенко В. А. О механизме выщелачивания сульфидов из шунгитовых пород. Горный информационно-аналитический бюллетень № 9. М.: МГГУ, 2007. С. 38–48.
5. Рожкова Н. Н., Зайденберг А. З., Кочнева И. В. Влияние механического диспергирования на характер вымывания металлов из шунгитовых пород // Проблемы геоэкологии Карелии, 1997, С. 82–89.
6. Ромашкин А. Е., Рычанчик Д. В., Голубев А. И. Геохимия редкоземельных элементов углеродсодержащих пород заонежской свиты Онежской структуры // Геология и полезные ископаемые Карелии, 2011. № 14. С. 163 – 177.
7. Садовничий Р. В. Рожкова Н. Н. Минеральные ассоциации высокоуглеродистых шунгитовых пород Максовской залежи (Онежская структура) // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. Серия Геология докембрия. 2014, № 1, С. 148–158.



# КОРРЕЛЯЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ МИНЕРАЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КАРТИРОВАНИЯ С ГЕОЛОГИЧЕСКИМИ УСЛОВИЯМИ УЧАСТКА «ВЫСОТА-181»

*Никифоров А. Г.*

*ИГ КарНЦ РАН, г. Петрозаводск*

## Общие геологические сведения

В работе рассматривается методика минерало-технологического картирования высокоглиноземистых метаморфогенно-метасоматических комплексов и особенности распределения промышленных минералов в условиях многостадийной переработки протолита синметаморфическими тектоническими и метасоматическими процессами. Исследуемый участок работ – проявление комплексных гранатовых руд «Высота-181», является примером структуры, состоящей из нескольких доменов различных метаморфических комплексов с наложенным кислотным метасоматозом кианит-мусковитовой фации. В силу разной проницаемости для растворов при метасоматических процессах гранат-биотитовые гнейсы в большей степени изменены метасоматически, чем амфиболиты и метаандезиты. Проявление гранатовых руд «Высота-181» расположено в Лоухском районе Северной Карелии в 15 км. к югу от п. Сосновый. Площадь объекта около 3,5 кв. км. В геологическом плане объект расположен в юго-западной части Хизоваарской структуры, которая, в свою очередь, является частью Парандовско-Тикшеозерского зеленокаменного пояса [1, 2].

Метасоматиты, развитые по породам кислого и основного состава, представлены Grt, Ky кварцитами, а также Qtz-Ms и Qtz-Ms-Ky (здесь и далее аббревиатуры минералов по Kretz R. [3]) сланцами, содержащими в различных сочетаниях и количествах Qtz, Ky, St, Grt, Bt, Ms, Am, Chl. К кислым породам приурочена большая часть метасоматических кварцитов, тогда как анхиомономинеральные гранатиты и анортитовые образования развиты в основных породах или приурочены к их контактам с алюмосиликатными метасоматитами [4]. Особенностью проявления «Высота» является высокое содержание граната практически во всех выявленных комплексах пород (кроме редких на участке основных метасоматитов и метаандезитов).

Наибольшее распространение среди промышленных минералов получили гранат, кианит,

ставролит, мусковит и кварц. Большинство видов промышленных минералов при этом различаются по минералогическим признакам, что является следствием разных условий минералообразования. Целью данной работы является выделение типов руд комплексных минералов и выявление пространственной связи комплексных руд индустриальных минералов с метасоматическими зонами кислотного выщелачивания на примере проявления Высота-181.

## Геолого-минералогическое строение

Особенностями метасоматических пород в сложно-метаморфизованных комплексах являются: наличие реликтовых участков пород, метасоматическая зональность, при которой от наиболее измененных, тыловых зон к слабоизмененным передовым наблюдаются закономерности, характеризующие метасоматические процессы, пересечение зонами метасоматических образований структур, литологических границ и зон метаморфической зональности.

Непосредственно влияющие на дальнейшее технологическое опробование и процесс переработки геолого-минералогические факторы, меняются в районах с проявленным метасоматозом с высокой частотой на небольших площадях. В связи с этим возникает сложность в выделении минерало-технологических типов пород. Картирование метасоматической зональности с выделением зон в перспективе дает хорошие результаты при комплексной оценке проявления (рис. 1). При таком подходе комплексы пород ясно разделяются по петрографическому составу в соответствии с изменяющимся в процессе метасоматоза химическим составом. Результаты петрографического и минералогического разделения важны при оценке содержания и минеральных особенностей промышленных минералов (Grt, Ky, Ms, St для данного проявления).

Стадийность формирования метасоматических комплексов связана с процессами кислотного выщелачивания и Fe-Mg метасоматоза. Кислотные метасоматиты представлены кварцитами, Ky и Grt кварцитами, Ms-Qtz сланца-

ми и промежуточными зонами Grt-St-Ky-Pl-Qtz, Grt-Bt-Ms-Ky-Pl-Qtz состава. Во всех тыловых и промежуточных зонах присутствует Grt, что связано с высоким содержанием Mg и Fe компонентов в исходных породах и тесной пространственной связью метасоматитов с Fe-Mg амфиболитами. Формирование метасоматических комплексов возможно по протолиту метаморфических пород различного состава: Grt и безгранатовым амфиболитам, Am гнейсам, метаандезитам и Bt-Grt гнейсам. Метасоматические колонки во всех случаях будут выглядеть различно, но самые поздние метасоматиты (метасоматиты тыловых зон) будут представлены Ky и Grt кварцитами с Ms или без него.

*Метаморфогенно-метасоматические комплексы, развитые в пределах проявления:*

- Амфиболиты гранатые и безгранатые, промежуточные метасоматические зоны по ним;
- Метаандезиты и амфиболитовые гнейсы, промежуточные метасоматические зоны Grt-Am-Bt-Ms-Pl-Qtz и Grt-St-Ms-Pl-Qtz состава;
- Гранат-биотитовые гнейсы, промежуточные зоны метасоматоза, представленные чередующимися Grt-Bt-Ms-Ky / Grt-St-Ky гнейсами и Grt-Bt-Ms сланцами, а также метасоматиты тыловых зон Grt-Ms-Qtz, Grt-Ky-Qtz состава.

Минеральный состав метасоматитов промежуточных и тыловых зон в значительной степени согласуется с характерными для района Хизоваарской структуры составами метасоматических пород [4], главное отличие заключается в повсеместном присутствии гранатов различного состава на участке «Высота-181».

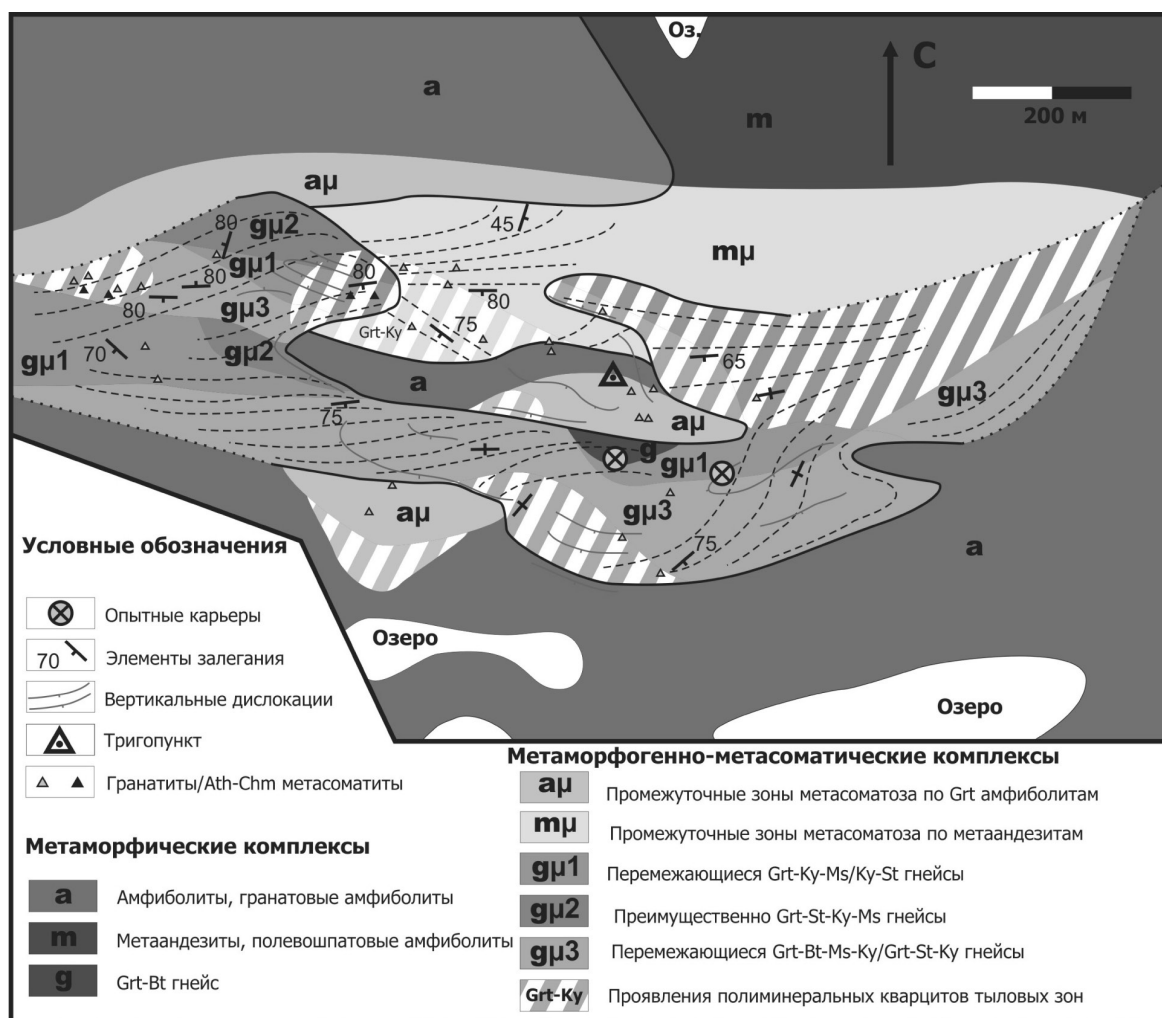


Рис. 1. Геолого-минералогическая карта-схема участка «Высота-181»

Неизмененные метаморфические Grt-Bt гнейсы (протолит). По ним развиваются метасоматиты, характеризующиеся постепенным изменением валового химического состава пород

в сторону большей глиноземистости и поочередным выносом K, Ca, Na, Mg, Fe, что является основным признаком кислотного метасоматоза кианитовой фации [5,6].

	Инертные компоненты
Grт+Bt+Pl+Qtz	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Na <sub>2</sub> O, CaO, MgO, FeO
Grт+St+Bt+Ms+Pl+Qtz (происходит дифференциация на обогащенные Bt и существенно St полосы и линзы, содержание St и Bt находится в обратной пропорциональной зависимости)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Na <sub>2</sub> O, CaO, MgO
Grт+St+Pl+Qtz+Ky Grт+Bt+Ms+Pl+Qtz+Ky	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Na <sub>2</sub> O, CaO Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Na <sub>2</sub> O, CaO K↑
Grт+Pl(к)+Ky+Qtz Grт+Pl(к)+Ms+Ky+Qtz	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Na <sub>2</sub> O - FeO Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Na <sub>2</sub> O - FeO K↑↓
Grт+Ky+Qtz Grт+Ms+Ky+Qtz	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Grт+Qtz Grт+Ky+Qtz Grт+Ms+Qtz	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Ky+Qtz Qtz	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>

#### Неизмененные метаандезиты.

	Инертные компоненты
Grт+Am+Bt+Pl+Qtz	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Na <sub>2</sub> O, CaO, MgO, FeO
Grт+Am+Bt+Ms+Pl+Qtz+St	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Na <sub>2</sub> O, CaO, MgO
Grт+Bt+Ms+Qtz+ Pl(к)+St (содержание St и Bt взаимозависимо)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Na <sub>2</sub> O
Grт+Bt+Ms+Qtz+Ky (Ky как правило в малых количествах, как и St)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> K↑
Grт+Ms+Qtz+Ky (слоды в малом количестве, что характерно для метасоматитов по метаандезиту)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Grт+Qtz+Ms	

#### Неизмененные Grт амфиболиты.

	Инертные компоненты
Grт+Am+Pl	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Na <sub>2</sub> O, CaO, MgO, FeO
Grт+Am+Pl+Qtz+St	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Na <sub>2</sub> O, CaO, MgO
Grт+Am+ Pl(к)+Qtz+St+Ky	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Na <sub>2</sub> O, MgO
Grт+Pl+Qtz+St+Ky (обособление ассоциаций Grт+Ky+St в кварците)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Grт+Ky+Qtz	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>

### Минералого-технологическая характеристика:

Основными промышленными минералами проявления являются гранат, кианит, мусковит и ставролит. Кианит является характерным промышленным минералом для Хизоваарского рудного поля [7,8].

#### Grт

Гранат присутствует практически во всех метаморфических и метаморфогенно-метасоматических комплексах проявления. Высокая концентрация граната наблюдается в породах промежуточных и тыловых зон метасоматоза. Это связано в первую очередь с высоким содержанием Fe и Mg минералов в породах протолита. В результате можно наблюдать повсеместно распространенные Grт и Grт-Ky кварциты. На всей

территории проявления распространены гранатиты, как следствие сопряженного с кислотным выщелачиванием Fe-Mg метасоматоза. Состав граната зависит как от пород протолита, так и от глубины метасоматических преобразований.

#### Ms

Формирование мусковита происходит при выносе Fe и Mg в процессе кислотного выщелачивания в породах, содержащих биотит. В соответствии с этим, наибольшее содержание мусковита отмечается в промежуточных метасоматических зонах по протолиту Grт-Bt гнейсов.

Биотит и мусковит часто образуют каймы вокруг граната, содержание мусковита при этом зависит от степени метасоматической переработки породы. По слюдам часто проявлена милонитизация, при этом наибольшее количество муско-

вита наблюдается в полосах тыловых метасоматитов Grt-Ms-Qtz состава.

#### St

Ставролит присутствует как минерал промежуточных зон метасоматоза по всем метаморфическим комплексам. Формирование ставролита возможно при кислотном выщелачивании Fe минералов Grt-Bt гнейсов. При этом наблюдается наследованная полосчатость в метасоматитах, с разделением на Grt-Bt и St зоны. Минерал часто проявлен в виде скелетных образований, часто обнаруживаются псевдоморфозы Ку по St крестам в зернах граната.

#### Ky

Формирование кианита является характерным для кислотнощелочного метасоматического выщелачивания. При последовательном выносе Fe, Mg, Ca, K наиболее представительным становится Qtz-Ky метасоматический парагенезис. Кианит выделяется в метасоматитах в виде ярко окрашенных, реже бесцветных крупнозернистых таблитчатых кристаллов, а также в виде иголь-

чатых, радиально-лучистых агрегатов. Размер от миллиметра до первых сантиметров, зерна не ориентированы.

Опыт изучения участка включает, таким образом, выделение «технологических типов» породы [1]. Такие типы включают в себя несколько минеральных комплексов, объединенных едиными технологическими свойствами и имеющих преобладающие содержания тех или иных промышленных минералов. Пространственная связь технологических типов породы с чередующимися метасоматическими зонами предполагает возможность разделения типов породы по валовому химическому и минералогическому составу (для примера приведены данные в табл. 1 и табл. 2 [1]). Технологические типы имеют определенные диапазоны содержания минералов, химизм и конкретную стадию формирования минералов в зависимости от этапа метасоматоза и метаморфического протолита. Промышленные минералы в пределах данных комплексов имеют различные структурные, химические и морфологические параметры.

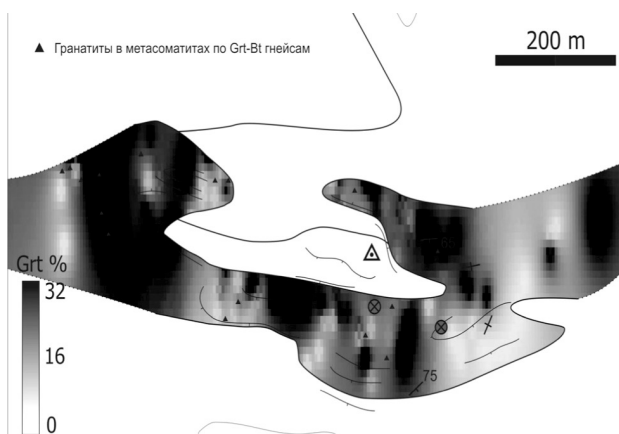


Рис. 2. Распределение граната в метасоматитах по кислым гнейсам

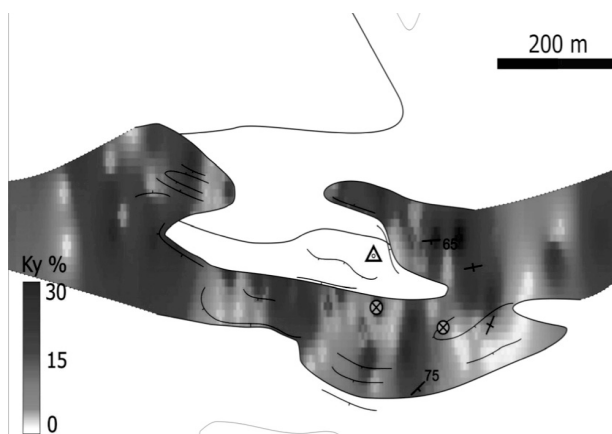


Рис. 3. Распределение кианита в метасоматитах по кислым гнейсам

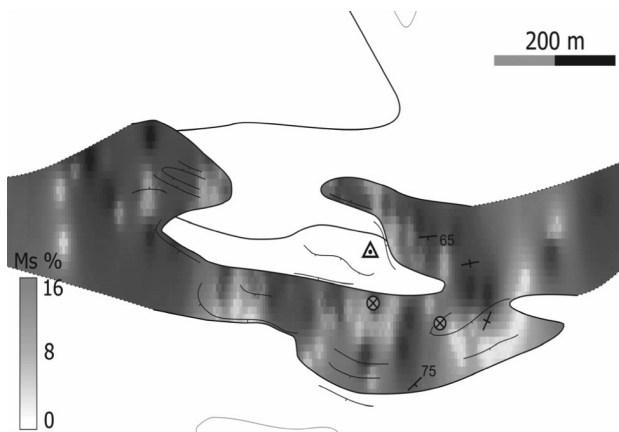


Рис. 4. Распределение мусковита в метасоматитах по кислым гнейсам

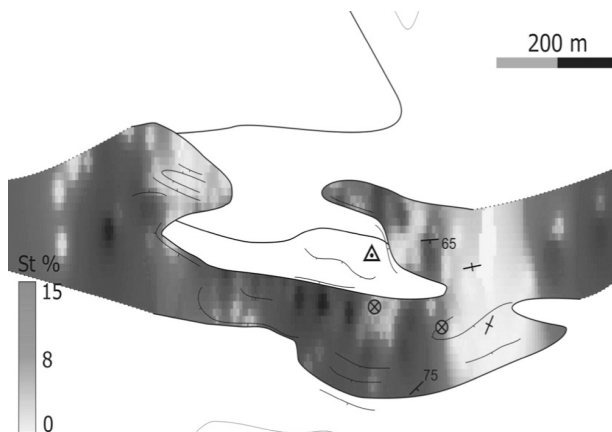


Рис. 5. Распределение ставролита в метасоматитах по кислым гнейсам



Таблица 1. Минеральный состав главных технологических типов пород

	Grt-Ky-Ms гнейсы		Grt-St-Ky-Ms гнейсы	Grt-Bt-Ms-Ky/Grt-St-Ky гнейсы		Grt-Bt гнейс
	B-VI	B-VII	B-IX	13–2001	14–2001	B-III
Гранат	15,6	13,4	35,5	11,6	29,7	20,69
Ставролит	0	1,2	13	0,8	4,3	1,03
Кварц	47,5	46,8	31,7	45,8	37,2	50
Плагиоклаз	8	4,2	0,2	9	6,1	21,12
Мусковит	2,1	1,9	0,5	9,8	2,1	0,03
Биотит	1,5	0,3	0,1	4,2	6,6	5,53
Кианит	23	30	14,4	16,5	11,8	0

Таблица 2. Химический состав главных технологических типов пород

	Grt-Ky-Ms гнейсы		Grt-St-Ky-Ms гнейсы	Grt-Bt-Ms-Ky/Grt-St-Ky гнейсы		Grt-Bt гнейс
	B-VI	B-VII	B-IX	13–2001	14–2001	B-III
SiO <sub>2</sub>	68,59	73,03	63,34	66,02	67,42	58,12
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19,18	17,63	18,7	16,7	19,16	20
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,87	0,52	1,63	10,57	1,01	0,88
FeO	4,38	3,59	11,63	-	6,03	7,33
MgO	0,76	0,52	0,99	1,66	0,83	2,43
CaO	2,88	2,23	1,22	2,45	2,16	4,03
Na <sub>2</sub> O	0,68	0,58	0,23	0,6	0,83	4,19

### Результаты

Геологическое картирование потенциально рудоносных участков с акцентом на процессах метаморфизма и метасоматоза дает достаточно информативную основу для минералогическо-технологического картирования руд промышленных минералов. Это связано, в основном, с четкой привязкой генезиса и/или перекристаллизации основных промышленных минералов с периодизацией метасоматических и метаморфических процессов.

Глубокое преобразование (вплоть до тыловых биминеральных зон) в условиях кислотного метасоматоза средних и кислых метаморфических пород приводит к образованию достаточно перспективных Ky-Qtz комплексов с содержанием кианита до 30 %. В условиях же

крайне высокой железистости и магнезиальности пород протолита и сопряженных с протолитом комплексов отмечается высокое содержание граната в породах промежуточных и тыловых зон, что видно на примере участка «Высота-181».

Выделение технологических типов породы по чередующимся промежуточным метасоматическим зонам в случае их близкой рудной специализации (например **St-Ky-Grt** и **Grt-Ky-St**) дает хорошие результаты, так как различия валового химического и, как следствие, минерального состава часто невелики, но чередуются волнообразно на небольших участках. В этом случае целесообразно объединять породы разных метасоматических зон в единый технологический тип (примеры объединения в таблицах 1 и 2).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Гранатовые руды Карелии / В. В. Щипцов, Т. П. Бубнова, Л. С. Скамницкая и др. Петрозаводск: КарНЦ РАН., 2009. 208 с.
2. Бибилова Е. В., Самсонов А. В., Щипанский А. А. и др. Хизоваарская структура Северо-Карельского зеленокаменного пояса как аккретированная островная дуга позднего архея: изотопно-геохронологические и петрологические данные // Петрология, 2003, Т. 11, № 3, с. 289–320.
3. Kretz, R., 1983. Symbols for rock-forming minerals. American Mineralogist 68, pp. 277–279.
4. Бушмин С. А. Метасоматиты месторождения Хизоваара (Северная Карелия) // Изв. АН СССР. Сер. Геол., 1978. № 7.
5. Глебовицкий В. А., Бушмин С. А. Послемигматитовый метасоматоз. Л. «Наука». 1983. 216 с.
6. Соколов Ю. М., Бушмин С. А. Пегматитизация и метасоматоз кианит-андалузит-силлиманитовой фациальной серии. Л. «Наука». 1978. 89 с.
7. Минеральное сырье Лоухского района. Петрозаводск: КарНЦ РАН. 1991. 191 с.
8. Небокситовое алюминиевое сырье России / В. А. Коротеев, В. Н. Огородников, Ю. Л. Войтеховский и др. Екатеринбург: УО РАН. 2011.

## НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МИНЕРАЛОГИИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

*Жерновский И. В.*

*БГТУ им. В. Г. Шухова, г. Белгород*

Вопросы передела минерального сырья при производстве строительных материалов еще не в должной мере входят в круг интересов технологической минералогии. При этом, несмотря на декларируемую междисциплинарность строительного материаловедения, методология минералогических исследований практически не находит должного применения в работах материаловедческого профиля.

Вступление промышленности строительных материалов в стадию устойчивого развития и по-

вышающиеся требования к интенсификации ее утилизационной роли и возрастающие экологические ограничения предполагают разработку новых подходов к использованию некондиционного и нетрадиционного минерального сырья. В особой степени это относится к направленному снижению использования в композиционных материалах самых энергоемких и неэкологичных, по способам производства, минеральных высококальциевых вяжущих, в частности – портландцемента, инициирующих основной объем техногенных выбросов.



Рис. 1. Историческая эволюция парадигм использования минерального сырья для производства материалов, по [1]

С начала прошлого столетия сменилось несколько парадигм в вопросах использования минерального сырья для производства материалов (рис. 1). Современные парадигмы ориентируют потребляющие отрасли промышленности на максимальное снижение техногенного прессинга на экосферу планеты и реализацию замкнутого цикла производства материалов. Это инициирует строительную индустрию на активную реализацию утилизационных задач, в частности, в отношении техногенных отходов горнодобывающей и энергетической отраслей. В связи с этим, актуальной задачей индустрии строительных матери-

алов является переход от мономинерального сырья, истощение запасов которого не вызывает сомнений, к полиминеральному, характеризующегося сложным полиминеральным составом и вариативностью свойств. Решение этой задачи может быть основано на разработке основ концептуального подхода для направленного формирования минеральных наноразмерных парагенезисов композиционных материалов на основе вариативности параметров фазовой и размерной наногетерогенности нанодисперсных и наноструктурированных природных и техногенных систем, используемых в качестве сырьевых компонентов.

Ранее было показано, что учет генетических и типоморфных особенностей минерального сырья для производства различных видов минеральных вяжущих и композитов на их основе позволяет существенно снизить энергоемкость производства и улучшить эксплуатационные свойства [2–3].

Представляется, что одним из важнейших факторов, определяющих особенности формирования минеральных новообразований, ортогенезисов, про определению, предложенному Н. В. Петровской (цит. по [4]) формирующих структурно-обусловленные прочностные свойства композиционных вяжущих, является фазово-размерная гетерогенность (ФРГ) сырьевых минеральных компонентов.

В связи с введением в понятийный аппарат строительного материаловедения новой терминологии целесообразно дать некоторые определения, связанные с фазово-размерной гетерогенностью минерального сырья. Стоит отметить, что вводимые понятия являются отражением такого фундаментального и генетически обусловленного свойства горных пород, как структура. Размерная гетерогенность в реальных минеральных системах различной генетической принадлежности варьируется от нано- до микромасштабного уровня структурной организации вещества – от первых нанометров у скрытокристаллических до первых микрон у высококристаллических минеральных образований.

Следует отметить, что под фазовой гетерогенностью необходимо понимать не только присутствие в полиминеральном сырье компонентов, принадлежащих к различным минеральным видам, но и наличие в мономинеральном различных полиморфных модификаций одного минерального вида. Под размерной гетерогенностью понимается различная степень кристалличности минеральных компонентов, которая количественно может быть охарактеризована в виде такого фундаментального параметра кристаллического состояния как размер кристаллитов.

Размерный диапазон этого показателя в реальных минеральных системах различной генетической принадлежности варьируется от нано- до микромасштабного уровня структурной организации вещества – от первых нанометров у скрытокристаллических, до первых микрон у высококристаллических минеральных образований.

Представляется непротиворечивым утверждение, что *отличия параметров ФРГ у однотипного по минеральному и химическому составу сы-*

*рья различного генезиса определяют его различное энергетическое состояние и, как следствие, реакционную способность.*

Вопросы изучения особенностей ФРГ и проявление фазово-размерного эффекта в природных минеральных системах всегда находились в сфере интересов исследователей геологического профиля [5–6]. Целесообразность введения в понятийно-предметную систему строительного материаловедения теоретических представлений о ФРГ минерального сырья обусловлена возможностью реализации на ее основе основополагающей триады материаловедения: «состав – размер – свойство». Идеологической основой для этого может служить положение, что *функциональные наносистемы в композиционных материалах приводят к расширению области оптимальности структуры* [7].

На этом основании можно сформулировать концепцию *вариативности фазово-размерной гетерогенности минерального сырья как фактора управления синтезом материалов и процессами структурообразования композитов.*

Для обоснования концепции вариативности ФРГ необходимо решение ряда задач фундаментальной направленности. К важнейшей из них следует отнести разработку *минералогических критериев выбора минерального сырья с оптимальными параметрами ФРГ для синтеза вяжущих различного типа твердения.*

Ко второй задаче этого уровня значимости относится разработка *принципов управления ФРГ сырьевых материалов механоактивационным воздействием.*

Природа ФРГ минерального сырья является генетически и кристаллоструктурно обусловленной. Это можно проиллюстрировать на упрощенной феноменологической модели изменения параметров ФРГ минералов кремнезема в процессах литогенеза (рис. 2).

Фазовая гетерогенность отражает увеличение количества фаз в минеральном парагенезисе кремнезема. Величина размерного фактора на приведенной модели адекватна усредненному размеру кристаллитов наиболее высокоразмерной фазы. В частности, он наименьший для аморфной формы кремнезема – А-опала (первые нанометры), возрастает до 15–20 нм для структурированного кристобалит-тридимитового СТ-опала (трепелоподобные породы) и может достигать первых сотен нанометров для высококристаллических разновидностей кварца.

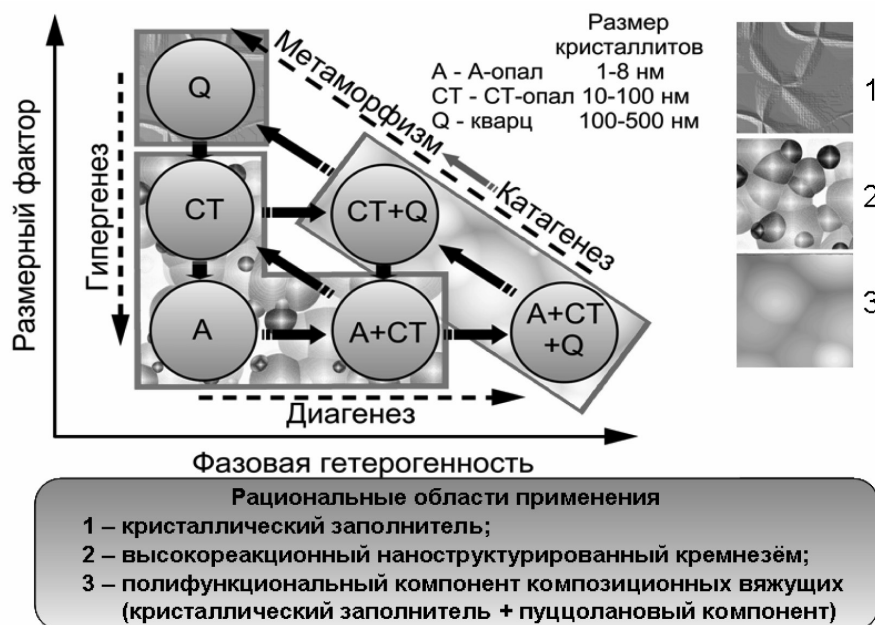


Рис. 2. Феноменологическая модель изменения параметров ФРГ минералов кремнезема в процессах литогенетического цикла

Исходя из различной, при прочих одинаковых условиях (например, удельной поверхности), реакционной активности в ряду А-опал > СТ-опал > кварц, появляется возможность рационального выбора сырья для его полифункционального применения в качестве компонента композиционных вяжущих. При этом А- и СТ-опалы будут выполнять функцию реакционного (наногетерогенного), а микрогетерогенный кварц – функцию структурообразующего компонента.

Таким образом, можно непротиворечиво утверждать, что ФРГ минерального сырья является интегральным показателем его структурного состояния и находится в причинно-следственных

отношениях с особенностями процессов петро- и техногенезиса.

Подход к выбору минерального сырья с позиций его фазово-размерной гетерогенности тесно связан с получившим широкое развитие в настоящее время наносистемным подходом к синтезу строительных материалов и процессам структурообразования композитов. Наносистемы, по отношению к вяжущему, могут быть представлены прото- и сингенетическими системами. Оба этих типа непосредственно влияют на образование эпигенетических наносистем, которые ответственны за формирование прочностных свойств вяжущих (рис. 3).

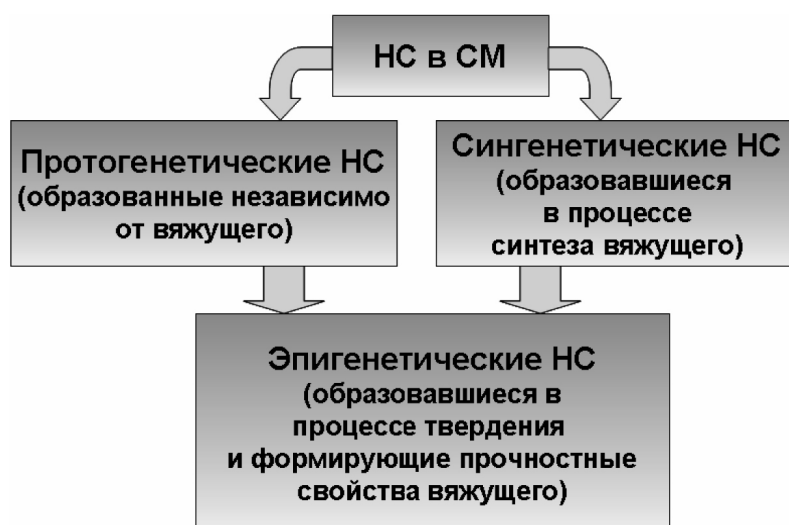


Рис. 3. Генетические типы наносистем (НС) в строительных материалах (СМ)



Комплексный анализ влияния вариативности фазовой и размерной гетерогенности сырья на процессы структурообразования эпистем способен дать эффективный инструмент направленного воздействия на процессы структурообразования минеральных вяжущих различного типа твердения.

Примечательной особенностью предлагаемого подхода является скромность его

инструментально-аналитического оформления. По минимальному счету, для количественного определения параметров ФРГ (это весовая концентрация каждой фазы и усредненный размер её кристаллитов) необходим только рентгенодифракционный метод в варианте полнопрофильного рентгеновского фазово-микроструктурного анализа (РФМА) (рис. 4).

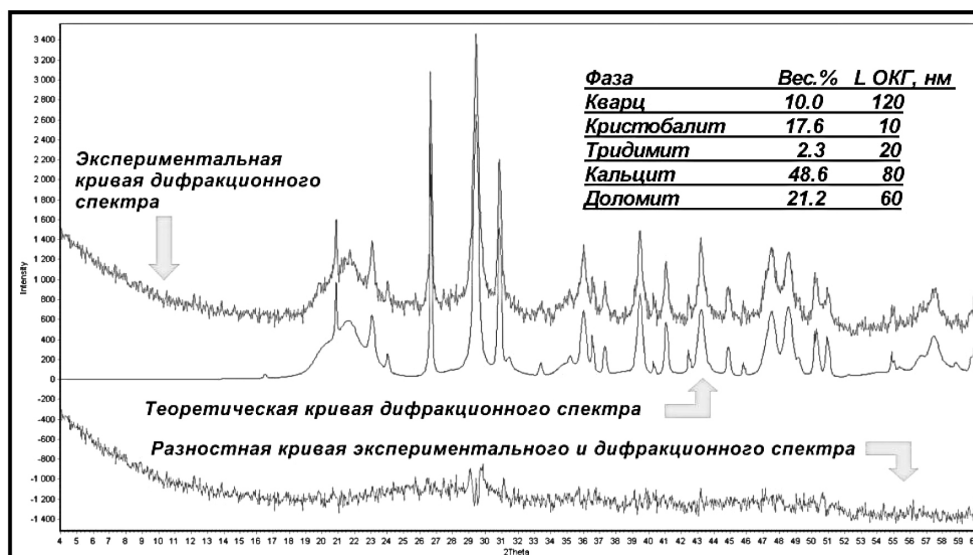
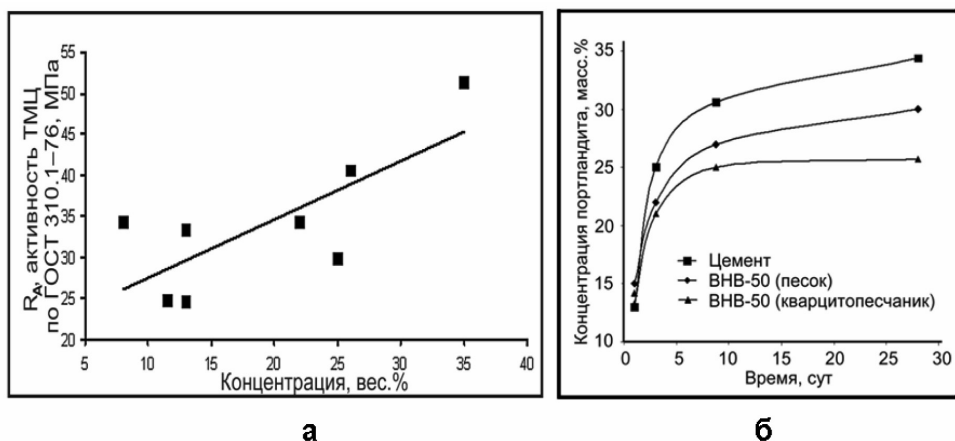


Рис. 4. Фазово-размерная гетерогенность минерального сырья с наноструктурированной компонентой (полнопрофильный РФМА фазово-размерногетерогенного сырья – трепела)

Направленное увеличение ФРГ минерального сырья возможно благодаря механоактивации. Так, доказана зависимость изменения ФРГ кварца при механоактивации от генетической принадлежности.

Рис. 5 иллюстрирует проверку предположения о влиянии ФРГ минерального сырья и его низкоразмерной компоненты как протогенетических микро- и наносистем на структурообразование вяжущих гидратационного типа твердения.



Экспериментально доказано, что концентрация  $\beta$ -кварца в механоактивированном кварцевом сырье положительно коррелирует с концентрацией аморфного кремнезёма, который приводит к связыванию свободного портландита в C-S-H.

Рис. 5. Зависимость активности композиционного вяжущего ТМЦ-50 от концентрации  $\beta$ -кварца в кремнеземном компоненте (а) и изменение концентрации свободного портландита в вяжущих различного состава (б)

Анализ влияния низкоразмерных минеральных протосистем и ФРГ механоактивированного кварцевого сырья на структурообразование цементного вяжущего показал прямую зависимость активности ТМЦ от параметров ФРГ, в частности, от концентрации наноразмерной модификации  $\beta$ -кварца. Кроме этого, обнаружено снижение концентрации свободного портландита в ряду: цемент (контрольный образец) – > ТМЦ-50 (на магматогенном песке) – > ТМЦ-50

(на метаморфогенном кварцитопесчанике). Это может являться следствием связывания свободного портландита в С-С-Н (гидросиликаты кальция) протогенетическими нано- и микроразмерными компонентами кремнеземного материала.

Интересную разновидность ФРГ удалось обнаружить у алюмосиликатного техногенного сырья – низкокальциевых зол-уноса ТЭС, являющихся сырьем для получения такого класса вяжущих атермального синтеза, как геополимеры.

Таблица 1. Количественный минеральный состав (по данным РФА)

Производители ЗУ	Содержание минеральных составляющих, %					
	Кварц	Муллит	Анортит	Магнетит	Гематит	Стекло фаза
Новотроицкая ТЭС (РФ)	23,5	10,7	4,3	1	–	60,5
Lafarge (США)	13,5	6,4	–	7,2	4,5	68,4
Троицкая ГРЭС (РФ)	18,7	9,3	–	1,9	–	70,1
Letabo (ЮАР)	23,8	4,7	–	–	–	71,5
Matla (ЮАР)	22,2	4,9	–	–	–	72,9

Особенностью фазового состава зол-уноса является существенное содержание алюмосиликатной стеклофазы, которая является основным источником алюмосиликатного материала в процессе геополимеризационного твердения (табл. 1). Для характеристики ФРГ стеклофазы был введен в рассмотрение параметр  $SiO_2$  – связ-

ности, который рассчитывался на основании пересчитанного химического состава стеклофазы по формуле:

$$f_{SiO_2} = \frac{v_{SiO_2}}{v_{Mg_2O} + v_{MgO} + 3v_{Mg_2O_3} + 2v_{MgO_2} + 5v} [8-9].$$

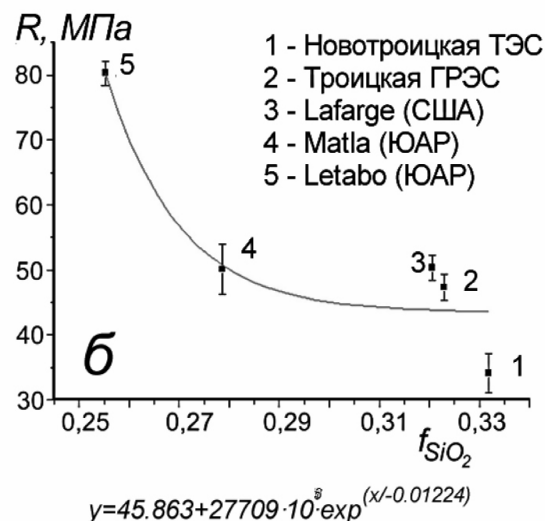


Рис. 6. Предел прочности при сжатии ГПВ на различных золах-уноса как функция фазовой (а) и фазово-размерной гетерогенности (б)

Степень  $\text{SiO}_2$ -связности структурообразующих элементов в стеклофазе следует понимать как показатель полимеризации в различные наноразмерные кластеры структурообразующих элементов – кремнекислородных тетраэдрических радикалов. Проверка зависимости предела прочности при сжатии геополимерных вяжущих (ГПВ) на различных золах-уноса от параметра ФГ (концентрация стеклофазы) и параметра ФРГ (степень  $\text{SiO}_2$  – полимеризации) представлена на рис. 6.

Таким образом, вариативность фазово-размерной гетерогенности минерального сырья является количественным параметром оценки эффективности минерального сырья и эффективным фактором управления синтезом минеральных вяжущих и процессами структурообразования композитов.

К основным задачам технологической минералогии строительных материалов, в аспекте развития концепции вариативности параметров ФРГ природного и техногенного сырья, следует отнести:

- разработку минералого-генетических критериев выбора минерального сырья, как потенциального источника наноразмерной минеральной компоненты;
- установление типоморфных наноминеральных парагенезисов минералов группы кремнезема различной формационно-генетической принадлежности;
- разработку принципов механоактивационного управления процессами наноструктурирования минерального сырья;

- установление зависимости концентрационных и размерных параметров минеральных компонентов от степени и формы механоактивационного воздействия;

- адаптацию аналитических методов анализа фазовой и размерной гетерогенности микро- и нанодисперсного вещества для задач и объектов исследования наносистемного строительного материаловедения;

- разработку теоретических основ представлений о природе влияния фазовой и размерной гетерогенности наносистемных сырьевых минеральных композиций на выбор рациональных областей использования при производстве строительных материалов;

- создание теоретических основ для формулирования принципов выбора и применения наносистемного минерального сырья при производстве минеральных вяжущих;

- определение рациональных областей применения кремнеземного природного и техногенного наноструктурированного и нанодисперсного сырья для производства вяжущих;

- определение рациональных видов наноструктурированного алюмосиликатного сырья различного генезиса как основы для производства энергоэффективных минеральных вяжущих с атермальной технологической историей.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в форме государственного задания.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Верхотуров А. Д., Воронов Б. А. Технологические и методологические аспекты минералогической материаловедения // Дальний Восток-2: Сборник статей. Отдельный выпуск Горного информационно-аналитического бюллетеня (научно-технического журнала) Mining Informational and analytical bulletin (scientific and technical journal). М.: Издательство «Торная книга». 2009. – № 5. – с.19–31.
2. Лесовик В. С. Повышение эффективности производства строительных материалов с учетом генезиса горных пород. М.: Изд. АСВ. 2006. – 526 с.
3. Строкова В. В. Влияние типоморфизма минерального сырья на синтез строительных материалов. / В. В. Строкова, А. В. Шамшуrow // Белгород: Изд-во БГТУ им. В. Г. Шухова, 2008. 211 с.
4. Жариков В. А. Парагенезис минералов, фации и формации. // Записки ВМО. 1968. Вып. 4. С. 510–514.
5. Таусон Л. В. Физико-химические превращения реальных кристаллов в минеральных системах / Л. В. Таусон, М. Г. Абрамович // Новосибирск: Наука, 1988, 271 с.
6. Наноминералогия. Ультра- и микродисперсное состояние минерального вещества / под. ред. Н. П. Юшкина, А. М. Асхабова и В. И. Ракина // С-Пб.: Наука. 2005. 214 с.
7. Строкова В. В. Некоторые актуальные вопросы междисциплинарного направления «Наносистемы в строительном материаловедении» / В. В. Строкова, И. В. Жерновский // Вестник Центрального регионального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук: сб. науч. ст./ РААСН, ВГАСУ. Воронеж, 2011. С. 99–105.
8. Аппен А. А. Химия стекла. Ленинград. СССР: Химия, 1974.
9. Глуховский В. Д., Кривенко П. В., Старчук В. Н., Пашков И. А., Чиркова В. В. Шлакощелочные бетоны на мелкозернистых заполнителях: Монография / Под ред. Проф. В. Д. Глуховского. – Киев: Вища школа. Головное изд-во, 1981. 224 с.

## НАШИ ЮБИЛЯРЫ

### ВАЙСБЕРГ ЛЕОНИД АБРАМОВИЧ



20 июня 1944 г. на Урале в г. Первоуральске родился Леонид Абрамович Вайсберг. В 1967 г. окончил Днепропетровский горный институт, был распределен в Ленинград в институт «Механобр», где начал работать в январе 1968 г. инженером. В настоящее время генеральный директор – научный руководитель открытого акционерного общества «Научно-производственная корпорация «Механобр-Техника»», известный специалист в области конструирования, расчета, наладки и эксплуатации горно-обогатительного оборудования, главным образом, для дробления, измельчения и классификации, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, действительный член Академии горных наук, профессор Национального минерально-сырьевого университета «Горный», член Всемирного клуба петербуржцев, лауреат премии им. А. П. Карпинского, двух премий Правительства РФ в области науки и техники, заслуженный строитель, отмечен высшей профессиональной наградой – Золотым знаком «Горняк России», «Почетный металлург», награжден медалью ордена «За заслуги перед Отечеством» II степени и орденом Монгольской Народной республики «Полярная Звезда» за заслуги в строительстве крупного горного предприятия в этой стране.

Он автор и соавтор более 260 публикаций. Среди них – Общие принципы проектирования

вибрационных машин. Машины для вибрационного разделения сыпучих смесей. Вибрационные грохоты. Вибрации в технике: Справочник в 6 т.т. Т. 4. Вибрационные процессы и машины // под ред. Э. Э. Лавендела. М., «Машиностроение», 1981; Проектирование и расчет вибрационных грохотов. М., изд. «Недра», 1986 г. 144 с.; Вибрационное грохочение сыпучих материалов. Моделирование процесса и технологический расчет грохотов. СПб, Механобр, 1994. (соавтор: Д. Г. Рубисов); Производство кубовидного щебня и строительного песка с использованием вибрационных дробилок. СПб, изд. ВСЕГЕИ, 2004 (соавторы: В. А. Арсентьев, Л. П. Зарогатский, . Д. Шуляков); Вибрационные дробилки. Основы расчета, проектирования и технологического применения. СПб, изд. ВСЕГЕИ, 2004. (соавторы: Л. П. Зарогатский, В. Я. Туркин). Просеивающие поверхности грохотов. Конструкции, материалы, опыт применения. СПб, изд. ВСЕГЕИ, 2005. (соавторы: А. Н. Картавый, А. Н. Коровников); Измельчение. Энергетика и технология. Москва. Изд. дом «Руда и Металлы», 2007 (соавторы: Г. Г. Пивняк, И. И. Кириченко, П. И. Пилов, В. В. Кириченко).

Автор и соавтор 70 полученных свидетельств и патентов на изобретения, промышленные образцы и полезные модели.





Семинар по технологической минералогии,  
апрель 2013, Санкт-Петербург

Готовя очередной выпуск материалов по технологической минералогии за 2014 год, мы не могли не вспомнить о юбиларе. Леонид Абрамович Вайсберг входит в состав бюро Комиссии по технологической минералогии. Совсем недавно 23–24 апреля 2013 г. в г. Санкт-Петербурге на базе НПК «Механобр-Техника» проводился 8-ой Российский семинар «Технологическая минералогия в оптимизации процессов рудоподготовки и обогащения минерального сырья». В программу семинара был включен «круглый стол» под председательством чл.-корр. РАН Л. А. Вайсберга. Ход дискуссии подтверждал, что качественный скачок в практике переработки руд следует ожидать с раз-



Заседание комиссии, Томск, 2013

работкой и внедрением новых более эффективных способов дезинтеграции. Повышение технологической эффективности следует искать в создании новых перспективных способов дезинтеграции минерального сырья. Использование аппаратуры высокого уровня позволяет выявлять причины нетехнологичности сырья и предлагать новые подходы для совершенствования оценок.

Комиссия по технологической минералогии признательна за поддержку и непосредственное участие в ее работе.

Многолетия Вам и новых успехов и достижений, дорогой Леонид Абрамович !

*Комиссия по технологической  
минералогии РМО*

## АННОТАЦИИ

УДК 553.04:550.4(470+571)

**Мелентьев Г. Б.** *Инновационный потенциал техногенных ресурсов России и роль технологической геохимии в их изучении и оценке перспектив комплексного промышленного использования* // Технологическая минералогия природных и техногенных месторождений. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. С. 8–30: рис. 1, табл. 1. Библ. назв. 36.

Представлена методология многоцелевого изучения техногенных ресурсов с целью оценки их как поликомпонентной системы и определением возможных областей использования. Ускоренное промышленное освоение техногенных ресурсов с использованием вышеизложенной методологии возможно при условии проявления государственной политической воли, корпоративного взаимодействия науки, бизнеса и власти, и реализации государственно-частного партнерства.

A methodology for the multi-purpose study of artificial resources to assess them as a multi-component system and to determine their possible application. The rapid industrial development of artificial resources, based on the methodology described, is possible, if a thoughtful government-controlled policy is pursued, science, business and authorities interact and public-private partnership is maintained.

УДК 622.17:622.343.5

**Зарецкий М.В.<sup>1</sup>, Горбатова Е.А.<sup>1</sup>, Ожогина Е.Г.** *Оценка минерально-сырьевого потенциала техногенного сырья* // Технологическая минералогия природных и техногенных месторождений. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. С. 30–35: рис. 6. Библ. назв. 2.

Разработана база данных текущих хвостов обогащения, включающая сбор, обработку, систематизацию, прогнозную оценку переработки отходов и предоставление информации.

A database of current tailings, including the collecting, processing, classifying and prognostic assessment of waste processing and presenting of information, was developed.

УДК 622.732.2

**Шадрунова И. В., Колодежная Е. В., Ожогина Е. Г., Горлова О. Е.** *Оценка минералогических особенностей техногенного минерального сырья при прогнозировании возможностей его переработки и селективности дезинтеграции* // Технологическая минералогия природных и техногенных месторождений. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. С. 35–42: рис. 5, табл. 3. Библ. назв. 3.

Представлены результаты экспериментального изучения фазового состава шлаков черной и цветной металлургии, хвостов обогащения марганцевых руд, морфоструктурных параметров шлаков и хвостов методами современной технологической минералогии для оценки их обогатимости и селективности раскрытия по границам срастания фаз в аппаратах центробежно-ударного дробления.

The results of the experimental study of the phase composition of ferrous and non-ferrous slags, the mill tailings of manganese ores, the morphostructural parameters of slags and tailings by modern technological mineralogy methods for assessment of their washability and selectivity of ore-grain boundary release in centrifugal impact mills are reported.

УДК 459.08:548

**Котова О. Б.** *Минералогическое геоматериаловедение: рациональное использование природного и техногенного минерального сырья* // Технологическая минералогия природных и техногенных месторождений. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. С. 42–46: рис. 4. Библ. назв. 12.

Представлено минералогическое геоматериаловедение – научное направление, в котором минералы рассматриваются как геоматериалы, технические свойства которых используются для решения конкретных технических задач. Отмечено, что технические свойства геоматериалов должны иметь четкий физический смысл. Решению этой задачи определяющая роль принадлежит технологической минералогии.

Mineralogical geomaterials study is a field of science, in which minerals are considered as geomaterials. The technical properties are used to solve specific technical tasks. It is noted that the technical properties of geomaterials are expected to have a well-defined physical meaning. Technological mineralogy plays a crucial role in solving of this problem.

УДК 549.08:622

**Астахова Ю. М., Быстров И. Г., Сорокин Е. М., Ожогина Е. Г., Ружицкий В. В.** *Прогнозная оценка качества железных руд месторождения Гурвунур* // Технологическая минералогия природных и техногенных месторождений. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. С. 46–50: рис. 4, табл. 2.

Охарактеризованы минералогические особенности магнетитовых руд месторождения Гурвунур, определяющие их качество и технологические свойства.

The mineralogical features of magnetite ore from the Gurvunur deposit, responsible for their quality and technological properties, are described

УДК 549.08:550.8

**Быстров И. Г., Пирогов Б. И.** *Особенности неоднородности титаномагнетитов магматогенных железных руд, определяющие их обогатимость* // Технологическая минералогия природных и техногенных месторождений. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. С. 50–57: рис. 6, табл. 6. Библ. назв. 9.

Для получения информации о технологических свойствах и возможности извлечения ценных компонентов из титаномагнетитовых руд необходимо всестороннее исследование слагающих их минеральных ассоциаций.

To obtain information on the technological properties and possible extraction of useful components from titanomagnetite ores, a multi-purpose study of their mineral associations is needed.

УДК 533.04:533.31

**Иванова М. В., Пирогов Б. И., Броницкая Е. С.** *Минералогические особенности титаномагнетитовых руд Чинейского месторождения, влияющие на их обогатимость* // Технологическая минералогия природных и техногенных месторождений. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. С. 57–61: рис. 1, табл. 2. Библ. назв. 4.

Минералого-технологические исследования титаномагнетитовой руды Чинейского месторождения показали, что эффективность обогащения зависит от особенностей минерального состава – характера срастания, морфологии, гранулярного состава выделений, неоднородности основных рудных и нерудных минералов.

The mineralogical and technological study of titanomagnetite ores from the Chineiskoye deposit has shown that dressing efficiency depends on mineral composition features such as the intergrowth pattern, morphology and grain size composition of aggregates and the heterogeneity of ore – and non-ore minerals.

УДК: 621.793:553.461(470.53)

**Ануфриева С. И., Кривоконова Г. К., Сладкова Г. А.** *Оценка возможности селективной карботермической твердофазной металлизации хромовых руд Сарановского месторождения* // Технологическая минералогия природных и техногенных месторождений. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. С. 61–64: табл. 7.

Проведены исследования на продуктах обогащения рентгенорадиометрической сепарации хромовой руды Сарановского месторождения. Показана возможность проведения селективной карботермической металлизации. Определен вещественный состав магнитной и немагнитной фракций после металлизации.

The beneficiation products of chromium, subjected to X-ray radiometric separation, were studied ore from the Saranovsk deposit. It is shown that selective carbothermal plating can be performed. The mineralogical composition of magnetic and non-magnetic fractions after plating was determined.

УДК 553.46(470.22)

**Кевлич В. И., Фролов П. В.** *Геолого-минералогические и технологические особенности хромитовых руд Аганозерского месторождения Карелии* // Технологическая минералогия природных и техногенных месторождений. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. С. 65–71: рис. 7, табл. 1. Библ. назв. 8.

Рассмотрены минералогические и технологические особенности хромитовых руд главного хромитового горизонта Аганозерского месторождения. По своему генезису Аганозерское месторождение хромитовых руд является типичным раннемагматическим образованием, формирование которого обусловлено дифференциальной кристаллизацией хромита из магматического расплава ультраосновного состава. По содержанию, размерам и текстурно-структурным характеристикам, можно выделить три типа руд: богатые руды; рядовые руды; бедные руды. Текстурно-структурные особенности, состав, технологические свойства слагающих ГХГ руд позволяют оценить не только качество хромитовых руд и применение традиционных методов обогащения, но и предсказать потери основных рудных минералов при дезинтеграции руд, а также направление разработки технологических схем обогащения. Установлено, что хромовые руды содержат извлекаемую платинометалльную минерализацию микронных классов крупности.

The mineralogical and technological characteristics of chromium ore from the main chromite horizon of the Aganozero deposit are described. Genetically, the Aganozero chromium ore deposit is a typical early magmatic deposit produced by differential crystallization of chromite from magmatic melt of ultrabasic composition. Three ore types: high-grade, run-of-mine and low-grade can be distinguished on the basis of concentration, size and textural and structural characteristics. The quality of chromium ore and the application of conventional dressing methods can be evaluated, the loss of major ore minerals upon disintegration can be predicted and the purpose-oriented development of dressing flow charts can be done, based on the textural and structural characteristics, composition and technological properties of the ores. Chromium ores have been found to contain recoverable micron-size PGE mineralization.

УДК 549.3/.62; 553.08

**Викентьев И. В.** *Исследование форм нахождения золота в сульфидах* // Технологическая минералогия

логия природных и техногенных месторождений. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. С. 71–76: рис. 1, табл. 4. Библ. назв. 22.

Обсуждаются формы нахождения золота в сульфидах (в том числе невидимая форма), которые определяют его потери при обогащении колчеданных руд. Дается подробный обзор современных методов анализа форм золота с обсуждением ограничений по их локальности и чувствительности. Приводятся результаты исследований руд колчеданных месторождений Урала, включающие методы сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии, термохимический (определение ионной формы золота), автоматизированной «количественной минералогии».

Gold modes in sulphides (including invisible gold), responsible for the loss of gold upon processing of massive sulphide ores, are discussed. A detailed overview of modern methods of analysis of forms of gold is made, and restrictions on their locality and sensitivity are discussed. The results of the study of VMS deposits in the Urals, including the scanning and transmission electron microscopy methods, the thermochemical (determination of the ionic form of gold) method and the automated «quantitative mineralogy method», are reported.

УДК 552.321.6

**Козлов А. П., Тимофеев А. С., Корнейчик О. Е.** *Исследование технологических свойств платиносодержащей минерализации в дунитовых рудах методом автоматизированного минералогического анализа* // Технологическая минералогия природных и техногенных месторождений. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. С. 76–82 : рис. 2, табл. 6. Библ. назв. 4.

В процессе исследований платиносодержащей минерализации в дунитовых рудах зональных базит-ультрабазитовых массивов Урала, Алдана и Камчатки методом автоматизированного минералогического анализа подтверждено присутствие платины исключительно в собственных минеральных формах, доминирующими среди которых являются платино-железистые сплавы (изоферроплатина и тетраферроплатина). В связи с этим, технологическая возможность производства платины из дунитовых руд должна рассматриваться исключительно как извлечение установленной платиносодержащей минерализации.

Полученные результаты полностью подтверждаются результатами проведенных ранее минералогических исследований и позволяют рекомендовать использование метода автоматизированного минералогического анализа для экспрессной оценки технологических свойств платиносодержащих дунитовых руд зональных базит-ультрабазитовых массивов.

The study of platiniferous mineralization in the dunite ore of zonal ultrabasic massifs in the Urals, Aldan

and Kamchatka by automated mineralogical analysis has confirmed the presence of platinum solely in own mineral forms dominated by platinum-iron alloys (isoferroplatinum and tetraferroplatinum). Therefore, the technological possibility of producing platinum from dunite ore should be considered solely as the recovery of the platiniferous mineralization revealed.

The results obtained are fully supported by earlier mineralogical and technological studies. A method for automated mineralogical analysis for express-assessment of the technological properties of dunite ore from zonal basic-ultrabasic massifs is, therefore, recommended.

УДК 546.59

**Ожогин Д. О.** *Золото-сульфидные руды: проблема упорного золота* // Технологическая минералогия природных и техногенных месторождений. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. С. 82–85: рис. 2. Библ. назв. 12.

Форма нахождения золота в сульфидах, гранулярный состав самородного золота определяют технологию его извлечения из золото-сульфидных руд. Показано, что в пирите руд месторождений Сухой Лог и Маломырское упорное золото представлено тонкодисперсным самородным золотом.

The form of the presence of gold in sulphides and the granular composition of rusty gold are responsible for the technology of its extraction from gold-sulphide ores. It is shown that rusty gold in the pyrites of ores from the Sukhoi Log and Malomyrskoe deposits occurs as finely dispersed native gold.

УДК 622.349.4:669.053.4

**Лихникевич Е. Г., Соколов С. В.** *Поведение перовскита в процессе гидрометаллургического переработки* // Технологическая минералогия природных и техногенных месторождений. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. С. 85–90: рис. 3, табл. 4. Библ. назв. 4.

Титан находит широкое применение в разных сферах промышленности. Однако месторождения с традиционными видами титанового сырья не удовлетворяют ее потребностям. Поэтому возникает задача освоения месторождений с нетрадиционными типами руд (например, с перовскитовыми). Месторождение Африканда (Кольский полуостров) относится к крупнейшим по ресурсам титана объектам, титаномagnetит-перовскитовой руды которого, к тому же, являются комплексными (титан, железо, ниобий, тантал, РЗЭ). В статье излагаются результаты изучения вещественного состава технологической рудной пробы, отобранной на этом месторождении, получения перовскитового концентрата и его переработки до конечных продуктов.

Проба характеризуется полиминеральным составом, разными текстурно-структурными свойствами и преобладанием перовскита (65 %) над титаномagne-



титом (7 %). Перовскитовый концентрат был получен из немагнитной фракции в процессе флотационного обогащения, проходившего без предварительного отделения кальцита и после его отделения. Химический анализ концентрата с более высоким содержанием перовскита (83 %) определил в его составе (мас. %) 51,1  $\text{TiO}_2$ , 1,40  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ , 0,064  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ , почти 6 % легких  $\text{REE}_2\text{O}_3$  и 0,086 Th.

Переработка концентрата осуществлялась способом автоклавного вскрытия перовскита растворами азотной кислоты при варьировании температуры (140–160°C), продолжительности процесса выщелачивания (1–4 ч) и концентрации кислоты (40–57 %). Такие условия эксперимента приводили к практически полному разложению перовскита и способствовали селекции Ti от Ca, Fe, Nb и REE. Извлечение титана в конечную продукцию составило более 98 %, а выход  $\text{REE}_2\text{O}_3$  – 97,6 %. Редкоземельные элементы и торий практически полностью переходят в азотнокислый раствор.

Titanium is widely applied in various industries. However, deposits of conventional forms of titanium raw material fail to meet its needs. Therefore, deposits with nonconventional ore types (e.g., perovskite ore) should be mined. The Afrikanda deposit on the Kola Peninsula is the biggest one in terms of titanium resources; moreover, its titanomagnetite-perovskite ores are complex (titanium, iron, niobium, tantalum and REE). Analysis of the composition of the technological ore sample collected from the deposit, the production of perovskite concentrate, and its processing to a finished product are discussed.

The sample displays a polymineral composition, various textural and structural properties and the predominance of perovskite (65 %) over titanomagnetite (7 %). Perovskite concentrate was produced from nonmagnetic fraction by flotation concentration, which occurred without preliminary separation of calcite and after its separation. Chemical analysis of concentrate with a higher perovskite content (83 %) has shown that it contains (wt. %) 51.1  $\text{TiO}_2$ , 1.40  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ , 0,064  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ , ~6 % light  $\text{REE}_2\text{O}_3$ , and 0,086 Th.

Processing of concentrate was accomplished by autoclave dissection of perovskite using nitric acid solutions and by varying temperature (140–160°C), the duration of the leaching process (1–4 h) and acid concentration (40–57 %). These experimental conditions have led to the almost complete decomposition of perovskite and contributed to the selection of Ti from Ca, Fe, Nb and REE. The extraction of titanium into the finished product was more than 98 %, and the  $\text{REE}_2\text{O}_3$  yield was 97,6 %. Rare-earth elements and thorium passed completely into the nitric acid solution.

УДК 549.514.51:553.063(470.22)

Скамницкая Л. С., Бубнова Т. П., Дубинчук В. Т., Раков Л. Т. *Научное обоснование потенциала кварца из техногенных отвалов слюдонос-*

*ных пегматитов (Карелия)* // Технологическая минералогия природных и техногенных месторождений. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. С. 90–99: рис. 14, табл. 3. Библ. назв. 3.

Проведено изучение потенциала кварца техногенных месторождений Карелии, представленных отвалами рудников, разрабатывавших с начала XX в/ слюдоносные пегматитовые жилы ряда месторождений. Определены минералогические особенности и направления промышленного использования кварца.

The potential of quartz from Karelia's artificial deposits, such as the dumps of some mines where micaceous pegmatite veins have been developed since the early XX century, is evaluated. The mineralogical characteristics and the industrial application of quartz are discussed.

УДК 549.514.5 (470.22)

Светова Е.Н., Скамницкая Л.С. *Типоморфные особенности и прогноз обогатимости кварцито-песчаников Гирвасской площади (Центральная Карелия)* // Технологическая минералогия природных и техногенных месторождений. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. С. 99–107: рис. 7, табл. 2. Библ. назв. 4.

В работе обсуждаются результаты минералогического исследования палеопротерозойских кварцито-песчаников Гирвасской площади Центральной Карелии, выполненного с целью оценки возможности их использования в качестве нетрадиционного материала для получения чистых кварцевых концентратов. Рассмотрены минеральный и химический составы кварцито-песчаников, выявлены основные типоморфные особенности, проведены технологические эксперименты по очистке кварца и получению кварцевых концентратов. Установлено, что чистота кварцевой крупки значительно возрастает с уменьшением размера зерен. Основной проблемой в ходе очистки являются налеты мусковитового цемента, остающиеся в небольшом количестве на поверхности кварцевых зерен после операций обогащения.

The results of the mineralogical and technological study of Paleoproterozoic quartzitic sandstones from the Girvas area of Central Karelia are discussed to assess their possible use as a nonconventional material for the production of high-purity quartz concentrates. The mineral and chemical composition of quartzitic sandstones was analyzed, the main typomorphic features were clarified, and technological experiments on the purifying and production of quartz concentrate were conducted. It is shown that as grain size decreases, quartz grit purity increases considerably. The key problem in purification is created by traces of muscovite cement that remain on the surface of quartz grains after enrichment.

УДК 549.08:622.7

**Кременецкая И. П., Рухленко Е. Д., Алексеева С. А., Веселова Е. Г., Лащук В. В.** *Получение ликвидного вермикулитового продукта из труднообогатимого сырья* // Технологическая минералогия природных и техногенных месторождений. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. С. 107–113: рис. 7. Библ. назв. 9.

Проведены минералого-технологические исследования отходов добычи флогопита ООО «Ковдорслуда». Разработана простая по используемому оборудованию и эксплуатации схема комплексного обогащения данного сырья. Рассмотрена возможность выделения в отдельный продукт термовермикулита и перспективы его использования для рекультивации загрязненных территорий.

Mineralogical and technological studies of phlogopite waste («Kovdorsluda» JSC) were performed. The flow-sheet of the integrated concentration of such a raw material, is easy in terms of the equipment used and exploitation, was developed. The possible recovery of thermal vermiculite into separate product and its use at contaminated lands rehabilitation were assessed.

УДК 549.08:550.8

**Якушина О. А., Ожогина Е. Г., Хозяинов М. С.** *Метод рентгеновской (микро)томографии в решении задач технологической минералогии: морфоструктурный анализ* // Технологическая минералогия природных и техногенных месторождений. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. С. 113–119: рис. 3. Библ. назв. 5.

Обсуждаются возможности использования метода рентгеновской (микро) томографии в комплексе современных физических методов изучения минерального сырья для решения задач технологической минералогии, в том числе - получение информации о минеральном составе и морфоструктурных характеристиках, разделения на рудные и породообразующие минералы, прогнозная оценка качества полезных ископаемых.

The possibility of using the method of X-ray Computed (micro)Tomography in a complex of modern laboratory physical testing methods for the study of mineral raw materials for technological mineralogy tasks, including to obtain data on mineral composition and morphostructural characteristics, separation of ore and rock-forming minerals, prognosis the quality of raw matters are discussed.

УДК 541.182.4/6:665.612.2

**Лыгина Т. З., Трофимова Ф. А., Губайдуллина А. М.** *Методические аспекты технологической оценки качества глинистого сырья* // Технологическая минералогия природных и техногенных месторождений. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. С. 119–120: рис. 1. Библ. назв. 5.

Рассматривается совокупность минералогических и кристаллохимических, физико-химических методов исследования глинистого сырья. Предлагаются минералого-технологические критерии оценки и использования глин в различных направлениях использования. Рассматриваются различные виды обработки глин с использованием дезинтеграторных приемов, механохимического активирования дисперсной фазы и дисперсионной среды с изменением коллоидно-химических свойств глинистых суспензий

Mineralogical and crystallochemical, physical and chemical methods for the study of clay as a raw material are discussed. Mineralogical and technological criteria of the assessment and various applications of clays are proposed. Various types of clay processing are described.

УДК 549.623.7 : 622.7.017.2

**Ильина В. П., Фролов П. В., Кевлич В. И., Климовская Е. Е., Попова Т. В., Инина И. С., Матрюкова С. Р., Кервенен А. В.** *Получение мономинеральной фракции серпентина из ультрамафитов Карелии* // Технологическая минералогия природных и техногенных месторождений. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. С. 122–129: рис. 8, табл. 2. Библ. назв. 9.

Выполнено исследование по возможности получения мономинерального серпентина (антигорита) из ультрамафитов участка Пентинсуо месторождения талькового камня Озерки для использования в триботехнике. Для обогащения серпентинитов пробы ПС-12 выбор крупности дробления и измельчения осуществлялся с учетом выявленных особенностей и состоял в дроблении до 2 мм и измельчении до 0,16 мм, что способствовало оптимальному раскрытию серпентина.

Испытания по выбранной технологии обогащения позволили получить концентрат серпентина (антигорит) для использования в триботехнике и тяжелый продукт с выходом 12 %, состоящий из миллерита, пентландита, магнетита, хромита и др.

Reference samples were analyzed and the possibility of producing monomineral serpentine (antigorite) from ultramafic rocks at the Pentisuo locality of the Ozerki soapstone deposit for use in tribo-engineering was assessed. To dress serpentine from sample PS-12, crushing and grinding coarseness was selected with regard for the features revealed. Crushing to 2 mm and grinding to 0,16 mm was done to contribute to the optimum opening of serpentine.

Tests, conducted using the dressing technology selected, have made it possible to produce serpentine (antigorite) concentrate for use in tribo-engineering and a heavy product with a 12 % yield which consists of millerite, pentlandite, magnetite, chromite, etc.

УДК 004.93, 622.7

**Горбунова Е. В., Чертов А. Н., Щипцов В. В.** *Возможности обогащения полевошпатного сырья Ка-*

**релии методом оптической сепарации** // Технологическая минералогия природных и техногенных месторождений. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. С. 129–135: рис. 9. Библ. назв. 4.

В статье приводятся результаты исследований полевошпатового сырья карельских рудников «Плоти-на» и «Хетолаамбино» оптическим методом. Предложена схема разделения, основанная на использовании таких селективных признаков, как «цвет» и «структура поверхности».

The results of the study of feldspar from Plotina and Khetolambino deposits, Karelia, by the optical method are reported. A separation scheme, based on the use of selective features, such as «colour» and «surface structure», is proposed.

УДК 550.42:553.521(470.22)

**Скамницкая Л. С., Бубнова Т. П. Геохимические особенности акцессорных минералов в гранитах рапакиви Салминского массива (редкоземельная минерализация)** // Технологическая минералогия природных и техногенных месторождений. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. С.135–143: рис. 12, табл. 4. Библ. назв. 5.

Проведено исследование геохимических особенностей различных фаз гранитов рапакиви Салминского массива (республика Карелия). Выявлены отличия, проявленные в контрастных уровнях концентрации редких и редкоземельных элементов в пирителитах и вторичных аляскитах. Это важно при определении промышленной значимости пород и выборе направлений их использования. **А также определяет комплексный подход при разработке технологии обогащения.**

The geochemical characteristics of the various phases of rapakivi granites from the Salmi massif, Republic of Karelia, were studied. Differences, indicated by the contrasting concentration levels of rare and rare-earth elements in pyterlites and secondary alaskites, were revealed. They are essential for estimating the industrial value of the rocks and selecting their applications. In addition, they are responsible for an integrated approach to the development of dressing technology.

УДК 553.9 (470.22)

**Садовничий Р. В., Рожкова Н. Н. Металлы в продуктах переработки высокоуглеродистых шунгитовых пород Зажогинского месторождения** // Технологическая минералогия природных и техногенных месторождений. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. С. 143–148: рис. 2, табл. 2. Библ. назв. 7.

В работе исследованы процессы выщелачивания шунгитовых пород растворами различной щёлочности и температуры, а также минеральный и химический составы полученных продуктов выщелачивания. Показана зависимость интенсивности процессов выщелачивания

и состава фильтрата от granulometрии образца. Установлено, что минеральный состав вещества фильтратов представлен преимущественно водными сульфатами и силикатами. Химический состав продуктов выщелачивания характеризуется повышенными по отношению к исходной породе содержаниями различных металлов.

Leaching of shungite rocks by solutions of varying alkalinity and temperature and the mineral and chemical composition of leaching products were studied. The intensity of the processes and the composition of the leach filtrate are shown to depend on the grain sizing of the sample. The mineral composition of the filtrate was found to consist dominantly of water sulphates and silicates. The concentration of various metals in the leachate is greater than that of the original rock.

УДК 622'1(084.3)

**Никифоров А. Г. Корреляция результатов минералого-технологического картирования с геологическими условиями участка «Высота-181»** // Технологическая минералогия природных и техногенных месторождений. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. С. 149–153: рис. 5, табл. 2. Библ. назв. 7.

В работе рассматривается методика минералого-технологического картирования высокоглиноземистых метаморфогенно-метасоматических комплексов и особенности распределения промышленных минералов в условиях многостадийной переработки протолита синметаморфическими тектоническими и метасоматическими процессами.

A method for the mineralogical and technological mapping of high-alumina metamorphogenetic-metasomatic complexes and the distribution of industrial minerals affected by the multi-stage reworking of protolith by synmetamorphic and tectonic and metasomatic processes, are discussed.

УДК 691.54-11

**Жерновский И. В. Некоторые аспекты технологической минералогии строительных материалов** // Технологическая минералогия природных и техногенных месторождений. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. С. 154–159: рис. 6, табл. 1. Библ. назв. 9.

Предложена концепция применения вариативности фазово-размерной гетерогенности природного и техногенного сырья как эффективного фактора управления синтезом минеральных вяжущих и процессами структурообразования строительных композиционных материалов.

The concept of the application of the variability of phase and dimensional heterogeneity of natural and artificial raw materials is proposed. It is an effective factor of management of synthesis of viscous mineral substances and the structurization of construction composite materials.

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие .....	5
<b>Мелентьев Г. Б.</b> Инновационный потенциал техногенных ресурсов России и роль технологической геохимии в их изучении и оценке перспектив комплексного промышленного использования .....	8
<b>Зарецкий М. В., Горбатова Е. А., Ожогина Е. Г.</b> Оценка минерально-сырьевого потенциала техногенного сырья .....	30
<b>Шадрунова И. В., Колодежная Е. В., Ожогина Е. Г., Горлова О. Е.</b> Оценка минералогических особенностей техногенного минерального сырья при прогнозировании возможностей его переработки и селективности дезинеграции .....	35
<b>Котова О. Б.</b> Минералогическое геоматериаловедение: рациональное использование природного и техногенного минерального сырья .....	42
<b>Астахова Ю. М., Быстров И. Г., Сорокин Е. М., Ожогина Е. Г., Ружицкий В. В.</b> Прогнозная оценка качества железных руд месторождения Гурвунур .....	46
<b>Быстров И. Г., Пирогов Б. И.</b> Особенности неоднородности тетаномagnetитов магматогенных железных руд, определяющие их обогатимость .....	50
<b>Иванова М. В., Пирогов Б. И., Броницкая Е. С.</b> Минералогические особенности тетаномagnetитовых руд Чинейского месторождения, влияющие на их обогатимость .....	57
<b>Ануфриева С. И., Кривоконев Г. К., Сладкова Г. А.</b> Оценка возможности селективной карботермической твердофазной металлизации хромовых руд Сарановского месторождения .....	61
<b>Кевлич В. И., Фролов П. В.</b> Геолого-минералогические и технологические особенности хромитовых руд Аганозерского месторождения Карелии .....	65
<b>Викентьев И. В.</b> Исследование форм нахождения золота в сульфидах .....	71
<b>А. П. Козлов, Тимофеев А. С., Корнейчик О. Е.</b> Исследование технологических свойств платиносодержащей минерализации в дунитовых рудах методом автоматизированного минералогического анализа .....	76
<b>Ожогин Д. О.</b> Золото-сульфидные руды: проблема упорного золота .....	82
<b>Лихникевич Е. Г., Соколов С. В.</b> Поведение перовскита в процессе гидрометаллургического перелодела .....	85
<b>Скамницкая Л. С., Бубнова Т. П., Дубинчук В. Т., Раков Л. Т.</b> Научное обоснование потенциала кварца из техногенных отвалов слюдоносных пегматитов (Карелия) .....	90
<b>Светова Е. Н., Скамницкая Л. С.</b> Типоморфные особенности и прогноз обогатимости кварцито-песчаников Гирвасской площади (Центральная Карелия) .....	99
<b>Кременецкая И. П., Рухленко Е. Д., Алексеева С. А., Веселова Е. Г., Лашук В. В.</b> Получение ликвидного вермикулитового продукта из труднообогатимого сырья .....	107
<b>Якушина О. А., Ожогина Е. Г., Хозяинов М. С.</b> Метод рентгеновской (микро)томографии в решении задач технологической минералогии: Морфоструктурный анализ .....	113
<b>Лыгина Т. З., Трофимова Ф. А., Губайдуллина А. М.</b> Методические аспекты технологической оценки качества глинистого сырья .....	119
<b>Ильина В. П., Фролов П. В., Кевлич В. И., Климовская Е. Е., Попова Т. В., Инина И. С., Мاستрюкова С. Р., Кервенен А. В.</b> Использование методов технологической минералогии для изучения серпентинитов участка Пентинсуо .....	122
<b>Горбунова Е. В., Чертов А. Н., Щипцов В. В.</b> Возможности обогащения полевошпатного сырья Карелии методом оптической сепарации .....	129



<b>Скамницкая Л. С., Бубнова Т. П.</b> Геохимические особенности акцессорных минералов в гранитах рапакиви Салминского массива (редкоземельная минерализация) .....	135
<b>Садовничий Р. В., Рожкова Н. Н.</b> Металлы в продуктах переработки высокоуглеродистых шунгитовых пород Зажогинского месторождения .....	143
<b>Никифоров А. Г.</b> Корреляция результатов минералого-технологического картирования с геологическими условиями участка «Высота-181» .....	149
<b>Жерновский И. В.</b> Некоторые аспекты технологической минералогии строительных материалов ....	154
К ЮБИЛЕЮ	
<b>Вайсберг Лев Абрамович</b> .....	160
АННОТАЦИИ .....	162

## CONTENTS

INTRODUCTION .....	5
<b>Melentyev G. B.</b> Innovation potential of Russia's artificial resources and the contribution of technological geochemistry to their study and assessment of possible integrated industrial application .....	8
<b>Zaretskiy M. V., Gorbatova E. A., Ozhogina E. G.</b> <i>Evaluation of the mineral potential of technogenic raw materials</i> .....	30
<b>Shadrunkova I. V., Kolodezhnaya E. V., Ozhogina E. G., Gorlova O. E.</b> Assessment of mineralogy and technological features of technogenic mineral raw materials to forecast the possibilities of their processing and the selectivity of disintegration .....	35
<b>Kotova O. B.</b> Mineralogical geomaterials study: management of natural and artificial raw materials .....	42
<b>Astakhova J. M., Bystrov I. G., Sorokin E. M., Ozhogina E. G., Ruzhitsky V. V.</b> Prognostic qualitative evaluation of iron ores from Gurvunur deposit .....	46
<b>Bystrov I. G., Pirogov B. I.</b> The heterogeneity characteristics of titanomagnetites from magmatogene iron ores responsible for their dressability .....	50
<b>Ivanova M. V., Pirogov B. I., Bronitskay E. S.</b> Mineralogical features of Chineisky field titanomagnetite ores affecting on their processing .....	57
<b>Anufrieva S. I., Krivokoneva G. K., Sladkova G. A.</b> Assessment of the possible selective carbothermal solid-phase plating of chromium ores from the Saranovsk deposit .....	61
<b>Kevlich V. I., Frolov P. V.</b> Geological mineralogical and technological characteristics of chromite ore from the Aganozero deposit, Karelia .....	65
<b>Vikentyev I. V.</b> Study of gold modes in sulphides .....	71
<b>Kozlov A. P., Timofeyev A. S., Korneichik O. E.</b> Study of the technological properties of platiniferous mineralization in dunite ores by automated mineralogical analysis .....	76
<b>Ozhogin D. O.</b> Gold-sulphide ores: rusty gold problem .....	82
<b>Likhnikovich E. G., Sokolov S. V.</b> Behaviour of perovskite in the process of hydrometallurgical processing .....	85
<b>Skamnitskaya L. S., Bubnova T. P., Dubinchuk V. T., Rakov L. T.</b> Scientific arguments in favour of the potential of quartz from mica pegmatite spoil heaps, Karelia .....	90
<b>Svetova E. N., Skamnitskaya L. S.</b> Typomorphic features and predicted washability of quartzitic sandstones from the Girvas area, Central Karelia .....	99
<b>Kremenetskaya I. P., Rukhlenko E. D., Alekseeva S. A., Veselova E. G., Lashchuk V. V.</b> Production of commercial vermiculite product from hard-concentrated raw materials .....	107
<b>Yakushina O. A., Ozhogina E. G., Khozyainov M. S.</b> X-ray (micro)tomography method for approaching technological mineralogy problems: morphostructural analysis .....	113
<b>Lygina T. Z., Trofimova F. A., Gubaidullina A. M.</b> Methodical aspects of the technological evaluation of the quality of clay as a raw material .....	119
<b>Ilyina V. P., Frolov P. V., Kevlich V. I., Klimovskaya E. E., Popova T. V., Inina I. S., Mastryukova S. R., Kerveney A. V.</b> Use of methods of technological mineralogy for studying of serpentinit of a site of Pentinsuo .....	122
<b>Gorbunova E. V., Chertov A. N., Shchiptsov V. V.</b> Possibilities of karelia feldspar enrichment by optical sorting method .....	129
<b>Skamnitskaya L. S., Bubnova T. P.</b> Geochemical characteristics of accessory minerals in the rapakivi granite of the Salmi massif (rare-earth mineralization) .....	135
<b>Sadovnichiy R. V., Rozhkova N. N.</b> Metals in the processing products of high-carbon shungite rocks from the Zazhogino deposit .....	143

<b>Nikiforov A. G.</b> Correlation of the results of mineralogical and technological mapping with the geological conditions at Vysota-181 locality .....	149
<b>Zhernovskiy I. V.</b> Some aspects of technological mineralogy of construction materials .....	154
CONGRATULATIONS	
<b>Vaysberg Lev Abramovich</b> .....	160
ABSTRACTS .....	162

Научное издание

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ МИНЕРАЛОГИЯ ПРИРОДНЫХ  
И ТЕХНОГЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

*Печатается по решению Ученого совета  
Института геологии КарНЦ РАН*

Сдано в печать 23.03.2015 г. Формат 60x80<sup>1/8</sup>.  
Гарнитура Times. Уч.-изд. л. 19,2. Усл.-печ. л. 20,0  
Тираж 150. Заказ № 269

Карельский научный центр РАН  
Редакционно-издательский отдел  
185003, г. Петрозаводск, пр. А. Невского, 50  
Отпечатано в типографии ИП Марков Н. А.